

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones



Trabajo Fin de Grado

Diseño de sistema energy harvesting usando celdas peltier

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Daniel Rodríguez Pizarro

Tutor/es: Pablo Ramos Sainz

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Diseño de sistema energy harvesting usando celdas peltier

Autor: Daniel Rodríguez Pizarro

Trabajo realizado en: Universidad de Alcalá

País: España

Tutor: Pablo Ramos Sainz

TRIBUNAL:

Presidente: Enrique Santiso Gómez

Vocal 1º: Miguel González Herráez

Vocal 2º: Pablo Ramos Sainz

FECHA: 03/06/2021

Agradecimientos

A mis padres y mi hermano por la confianza y la educación que me habéis transmitido para poder conseguir mis objetivos y a mis amigos de toda la vida y los que he podido conocer en la universidad por su apoyo constante.

Índice de contenido

Resumen.....	1
Abstract.....	1
Resumen extendido	3
1 Introducción	5
1.1 Diagrama de bloques de un sistema harvesting termoelectrico.....	5
1.2 Aplicaciones	6
1.3 Objetivo del proyecto	10
2 Principios básicos de la termoelectricidad	12
2.1 Efectos termoelectricos	13
2.1.1 Efecto Seebeck	13
2.1.2 Efecto Peltier	15
2.1.3 Efecto Thomson	15
2.1.4 Relaciones Kelvin	15
3 Material termoelectrico.....	17
3.1 Rendimiento. Figura de Mérito	17
3.2 Tipos de semiconductores	18
3.3 Propiedades termoelectricas	18
3.4 Material convencional	20
4 Análisis de la celda peltier	24
4.1 Elementos de una celda peltier.....	24
4.2 Análisis de la celda peltier como generador termoelectrico.....	26
4.2.1 Potencia generada.....	26
4.2.2 Eficiencia energética	28
4.2.3 Asociaciones de celdas peltier.....	29
4.3 Módulos comerciales.....	30
4.4 Disipación del calor.....	32
4.4.1 Transferencia de calor	32
4.4.2 Resistencia térmica.....	34
4.4.3 Interfaz térmica	34
4.4.4 Transferencia de calor en la superficie caliente	35
4.4.5 Modelo equivalente térmico.....	35
5 Regulador de tensión.....	37
5.1 Topologías básicas	37
5.1.1 Convertidor DC-DC reductor.....	38

5.1.2	Convertidor DC-DC elevador	39
5.1.3	Convertidor DC-DC reductor-elevador	40
5.2	Elección del convertidor.....	41
5.2.1	LTC3106	42
5.2.2	LTC3108	47
5.3	Almacenamiento energético	51
5.4	Diseño propuesto.....	52
6	Simulación del diseño.....	55
6.1	Simulación de la celda Peltier	55
6.1.1	Esquema	56
6.1.2	Dispositivos comerciales seleccionados para la simulación	59
6.1.3	Cálculo de las propiedades termoeléctricas de la celda.....	60
6.1.4	Simulación: Estimulación y representación	63
6.1.5	Simulación de la celda peltier en función de la carga y en condiciones ideales .	65
6.1.6	Simulación de la celda peltier en función del disipador	67
6.1.7	Simulación de la celda peltier con disipador comercial en función de la carga..	68
6.1.8	Simulación con asociaciones de celdas peltier	69
6.2	Simulación del regulador de tensión	78
6.2.1	Simulación del LTC3106	78
6.2.2	Simulación del LTC3108	81
6.3	Tiempo de carga.....	84
6.3.1	Fuente de respaldo principal.....	84
6.3.2	Fuente de respaldo secundaria.....	86
6.3.3	Dispositivos móviles	88
7	Conclusiones	92
	Pliego de Condiciones.....	94
	Presupuesto	95
	Presupuesto para el análisis y diseño del sistema termoeléctrico	95
	Presupuesto para implementar el diseño propuesto	96
	Bibliografía	98
	Anexos.....	101

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de sistemas energy harvesting.....	5
Figura 2. Diagrama de bloques básico de un sistema harvesting termoeléctrico	6
Figura 3. Automóviles como fuente de calor	7
Figura 4. Componentes de un automóvil que expulsan calor.....	7
Figura 5. Industria como fuente de calor (1)	8
Figura 6. Industria como fuente de calor (2)	8
Figura 7. Calor desprendido por una persona.....	8
Figura 8. Ejemplo de conversor termoeléctrico wearable (1)	9
Figura 9. Ejemplo de conversor termoeléctrico wearable (2)	9
Figura 10. Calor desprendido en una vivienda.....	9
Figura 11. Demostración de Thomas J. Seebeck del efecto Seebeck.....	12
Figura 12. Modelo de marcapasos con pu-238.....	13
Figura 13. Generador termoeléctrico de radioisótopos (RTG).....	13
Figura 14. Esquema básico de un termopar	14
Figura 15. Variación del coeficiente Seebeck en varios metales	14
Figura 16. Variación de las propiedades termoeléctricas en aislantes, semiconductores y metales.	17
Figura 17. Estructura cristalina del silicio.....	18
Figura 18. Ecuaciones para el cálculo de las propiedades termoeléctricas	19
Figura 19. Variación del coeficiente Seebeck del BiSbTe y Bi ₂ Te ₃	20
Figura 20. Variación de la conductividad termal del BiSbTe y Bi ₂ Te ₃	20
Figura 21. Variación de la conductividad eléctrica del BiSbTe y Bi ₂ Te ₃	20
Figura 22. Variación de ZT en varios materiales	22
Figura 23. Componentes de un módulo peltier	24
Figura 24. Esquema eléctrico de un módulo peltier con una carga conectada.....	26
Figura 25. Circuito eléctrico equivalente de una célula peltier	27
Figura 26. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación en serie de dos celdas peltier ..	29
Figura 27. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación en paralelo de dos celdas peltier	29
Figura 28. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación mixta de tres celdas peltier	29
Figura 29. Modulo TEG 12611	30
Figura 30. Modulo TEC 12706	30
Figura 31. Modulo peltier SP1848-27145 SA.....	31
Figura 32. Modulo peltier GM200-127-14-16 (1).....	31
Figura 33. Disipador con base y aletas rectangular.....	32
Figura 34. Disipador en forma de dedo.....	32
Figura 35. Disipador con aletas extendida	32
Figura 36. Sección de la superficie extendida de un disipador	33
Figura 37. Pasta térmica.....	34
Figura 38. Lamina de grafito.....	34
Figura 39. Rellenador de hueco.....	34
Figura 40. Conjunto de elementos acondicionadores de una celda peltier.....	35
Figura 41. Modelo equivalente térmico	35
Figura 42. Variación de la corriente que atraviesa la bobina en MCC y MCD	38
Figura 43. Esquema del convertidor dc-dc reductor	38
Figura 44. Esquema del convertidor dc-dc elevador.....	39
Figura 45. Esquema del convertidor dc-dc reductor-elevador	40

Figura 46. Regulador de tensión RECOM	41
Figura 47. Regulador de tensión TRACO POWER	41
Figura 48. Regulador de tensión LTC	41
Figura 49. Captura de algunos de los dispositivos LTC aplicables a un sistema harvesting termoelectrico.....	41
Figura 50. Diagrama de pines del LTC3106	42
Figura 51. Curva de la eficiencia del LTC3106 frente a la tensión de entrada	43
Figura 52. Diagrama de bloques del LTC3106	44
Figura 53. Esquema del convertidor dc-dc del LTC3106	46
Figura 54. Configuración del LTC 3108 y tiempo de carga de Vout.....	48
Figura 55. Diagrama de bloques del LTC3108.....	48
Figura 56. Configuración del LTC3108 para tensiones de entrada mayores a 5V.....	49
Figura 57. Configuración para el uso de dos dispositivos LTC3108	50
Figura 58. Configuración del LTC3108 para cargar un supercondensador	50
Figura 59. Circuito equivalente básico de un supercondensador	51
Figura 60. Esquema del diseño propuesto realizado en LTspice	52
Figura 61. Esquema realizado en Simulink para la simulación de la celda peltier	56
Figura 62. Bloque Peltier Device de Simulink.....	57
Figura 63. Bloque Thermal Mass de Simulink.....	57
Figura 64. Bloque Temperature Source de Simulink	57
Figura 65. Bloques del esquema que componen el disipador	58
Figura 66. Bloque Thermal Resistance de Simulink.....	58
Figura 67. Bloques Heat Flow Rate Sensor y Temperature Sensor.	58
Figura 68. Medidas de la etapa de salida del esquema de Simulink	59
Figura 69. Bloques que conforman el subsistema de la etapa de salida del esquema.....	59
Figura 70. Celda peltier GM200-127-14-16 de European Thermodynamics. (2).....	59
Figura 71. Disipador SKV707014-CU de Wakefield-Vette.....	60
Figura 72. Disipador 511-3M de Wakefield-Vette.	60
Figura 73. Curvas obtenidas del coeficiente Seebeck, Conductividad térmica y resistividad eléctrica de GM200-127-14-16	61
Figura 74. Dimensiones del GM200-127-14-16	61
Figura 75. Parámetros del Datasheet GM200-127-14-16 para el cálculo de R_{in}	61
Figura 76. Curvas obtenidas del coeficiente Seebeck total resistencia eléctrica y conductancia térmica de GM200-127-14-16.....	62
Figura 77. Curvas obtenidas de la tensión, corriente y potencia de GM200-127-14-16.....	63
Figura 78. Curvas de la tensión, corriente y potencia del Datasheet del GM200-127-14-16	63
Figura 79. Resultados de simulación de la celda peltier en función de la carga y en condiciones ideales.....	65
Figura 80. Resultados de simulación de la celda peltier en función del disipador.....	67
Figura 81. Resultados de la simulación de la celda peltier con disipador comercial en función de la carga	68
Figura 82. Circuito eléctrico equivalente de la asociación en serie de dos celdas peltier	69
Figura 83. Resultados de la simulación con asociación en serie.....	69
Figura 84. Circuito eléctrico equivalente de la asociación en paralelo de dos celdas peltier.....	71
Figura 85. Resultados de la simulación con asociación en paralelo.....	71
Figura 86. Circuito eléctrico equivalente de la asociación mixta simétrica de cuatro celdas peltier	73
Figura 87. Resultados de la simulación con asociación mixta tipo 1	73
Figura 88. Circuito eléctrico equivalente de la asociación mixta de tres celdas peltier	75
Figura 89. Resultados de la simulación con asociación mixta tipo 2.....	75
Figura 90. Resultados de la simulación en paralelo con un solo disipador	77
Figura 91. Esquema de la simulación del LTC3106	78

Figura 92. Parámetros de la tensión de entrada para la simulación del LTC3106	79
Figura 93. Curvas de tensiones y corrientes en el arranque de la simulación del LTC3106.....	80
Figura 94. Curvas de tensiones y corrientes durante la carga de Vstore de la simulación del LTC3106	80
Figura 95. Esquema de la simulación del LTC3108	81
Figura 96. Curvas de tensiones y corrientes en el arranque de la simulación del LTC3108.....	81
Figura 97. Curvas de tensiones y corrientes durante la carga de Vstore de la simulación del LTC3106	82
Figura 98. Variación de la corriente de carga de Vstore del LTC3108.....	82
Figura 99. Curva ampliada de la variación de la corriente de carga de Vstore del LTC3108 en el primer tramo.....	83
Figura 100. Curva ampliada de la variación de la corriente de carga de Vstore del LTC3108 en el segundo tramo	83
Figura 101. Esquema de la simulación del supercondensador en Simulink.....	84
Figura 102. Bloque Supercapacitor de Simulink.....	84
Figura 103. Supercondensador de 90F 4.2V de Vishay.....	84
Figura 104. Simulación de la recarga de la fuente de respaldo principal por LTC3106	85
Figura 105. Simulación de la recarga de la fuente de respaldo principal por LTC3108	86
Figura 106. Supercondensador de 1F y 5.4V de AVX Corporation	86
Figura 107. Simulación del tiempo de carga de la fuente de respaldo secundaria por 3108 hasta 3.3V	87
Figura 108. Simulación del tiempo de carga de la fuente de respaldo secundaria por 3108 de 3.3V hasta 5.2V.....	87
Figura 109. Rendimiento de las celdas peltier con la configuración más eficiente.....	88
Figura 110. Representaciones de las características típicas del LTC3106.	89

Índice de tablas

Tabla 1. Figura de Mérito de algunos semiconductores típicos	21
Tabla 2. Propiedades termoelectricas de la mayoría de los semiconductores actualizados	21
Tabla 3. Tabla de verdad para la selección de Vout del LTC3106	44
Tabla 4. Tabla de verdad para la selección de los límites de Vstore del LTC3106	45
Tabla 5. Tabla de verdad para la selección del límite de la corriente del LTC3106	46
Tabla 6. Tabla de verdad para la selección de Vout del LTC3108	49
Tabla 7. Parámetros introducidos de la celda peltier seleccionada para la simulación	64
Tabla 8. Parámetros obtenidos de la celda GM200-127-14-16 con disipador SKV707014-CU	79
Tabla 9. Rango de valores del LTC3106.....	85
Tabla 10. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con Iout=80mA	89
Tabla 11. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con Iout=190mA	90
Tabla 12. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con Iout=280mA	90
Tabla 13. Presupuesto para los recursos hardware utilizados para la realización del TFG.....	95
Tabla 14. Presupuesto para los recursos software utilizados para la realización del TFG.....	95
Tabla 15. Tiempo empleado a la realización del TFG	95
Tabla 16. Presupuesto total para el análisis y diseño de un sistema termoelectrico.....	95
Tabla 17. Presupuesto para la celda peltier y disipador seleccionados en la simulación	96
Tabla 18. Presupuesto para los componentes principales del diseño de regulación de tensión propuesto	96
Tabla 19. Presupuesto total para implementar el diseño propuesto	96

Glosario de acrónimos y abreviaturas

ESR	Equivalent Series Resistance
EPR	Equivalent Parallel Resistance
MCC	Modo Conducción Continua
MCD	Modo Conducción Discontinua
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PWM	Pulse Width Modulation
RTG	Radioisotope thermoelectric generator
TEC	Thermoelectric Cooler
TEG	Thermoelectric Generator
ZT	Figura de Mérito

Resumen

El presente proyecto consiste en optimizar un sistema *energy harvesting* termoeléctrico con el fin de alimentar dispositivos electrónicos portátiles de bajo consumo utilizando celdas peltier.

Para ello, se ha realizado un profundo estudio de su tecnología para poder realizar una simulación precisa de su comportamiento ante distintos factores mediante la herramienta MATLAB/Simulink.

Posteriormente, se ha escogido la electrónica que mejor se adapta para regular la electricidad generada.

Palabras clave: Celda peltier, temperatura, disipador, regulador de tensión, simulación.

Abstract

This project focuses on optimizing a thermoelectric energy harvesting system for powering low-consumption portable electronic devices using peltier cells.

To do so, an in-depth study of its technology has been carried out in order to perform an accurate simulation of its behaviour against different factors using the MATLAB/Simulink tool.

Subsequently, the best-suited electronics for regulating the generated electricity have been selected.

Key words: Peltier cell, temperature, heat sink, voltage regulation, simulation.

Resumen extendido

Uno de los grandes problemas a nivel global es el aumento gradual de la demanda energética y por consiguiente el aumento de las emisiones de sustancias contaminantes a la atmósfera. Por esta razón desde hace tiempo es cada vez más frecuente el empleo de sistemas *energy harvesting*, una alternativa ecológica que aprovecha energía presente en nuestro entorno.

Este TFG se centra en generar electricidad en zonas remotas aprovechando una de las fuentes de energía residual más destacada, el calor.

Como conversor termoeléctrico se han empleado celdas peltier y para optimizar su funcionamiento se ha desarrollado una simulación en el entorno MATLAB/Simulink que permite, a partir de las especificaciones técnicas que ofrece el fabricante, evaluar su rendimiento en función de la carga aplicada, el disipador de calor empleado, la temperatura a la que está expuesta y el número de celdas y tipo de configuración.

Previamente se ha realizado un estudio de los principios básicos de la termoelectricidad, los materiales actualmente empleados, el funcionamiento de las celdas peltier como generadores eléctricos y de la tecnología de los disipadores de calor.

Además, se ha propuesto un diseño que regula la tensión de salida de las celdas, el cuál se ha simulado mediante la herramienta LTSpice para analizar su respuesta.

Se concluye que la celda peltier junto al regulador de tensión propuesto es capaz de alimentar dispositivos de bajo consumo.

Capítulo 1

1 Introducción

Un sistema *energy harvesting* o recolector de energía consiste en capturar energía residual (natural o artificial) presente en cualquier entorno para convertirla en electricidad con el objetivo alimentar sistemas electrónicos de bajo consumo.

Existen diferentes técnicas para generar electricidad en función de la fuente de energía. Las más usadas son el movimiento, los gradientes térmicos, la luz, la radiación electromagnética y la energía química.

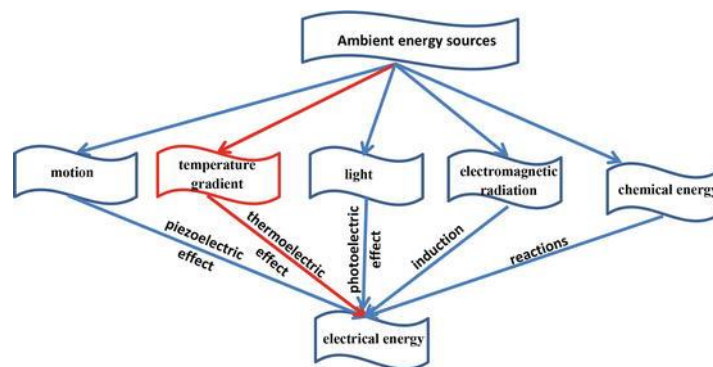


Figura 1. Tipos de sistemas *energy harvesting*

La termoelectricidad no es la más eficiente de todas, pero en los últimos años se han conseguido grandes avances en su tecnología.

Además de las fuentes de calor naturales, en muchos procesos de generación de electricidad gran parte de la energía se pierde en forma de calor por lo que dispone de un gran rango de aplicaciones posibles.

Actualmente se utiliza principalmente para generar electricidad en lugares de difícil acceso, aunque también se aplica en el entorno militar, aeroespacial o médico.

1.1 Diagrama de bloques de un sistema harvesting termoeléctrico

Los elementos básicos de un sistema termoeléctricos son los siguientes:

- **Generador termoeléctrico (TEG):** Con la presencia de un gradiente térmico genera un potencial eléctrico en sus terminales de salida basándose en el efecto Seebeck. Su principal ventaja es la conversión directa de calor a energía eléctrica en comparación con otros sistemas de generación que aprovechan la energía térmica.
- **Fuente de Calor:** Se puede aprovechar cualquier fuente de calor de nuestro entorno. Por ejemplo, el calor que desprende tubería de agua caliente de cualquier edificio, el del motor de un vehículo o aplicar directamente la llama de una vela.
- **Disipador:** Necesario para mantener el gradiente térmico. Evita que el lado frío no aumente su temperatura.

- **Regulador de tensión:** Permite modificar el voltaje obtenido a otro nivel de tensión que necesitemos para la aplicación del sistema. Los dispositivos TEG necesitan una gran diferencia de temperatura para tener un nivel óptimo de tensión, por ello se suelen utilizar en estos sistemas un convertidor elevador.
- **Carga:** Si el consumo energético del dispositivo electrónico es menor que la potencia generada podemos almacenar ese exceso de energía. Los supercondensadores son almacenadores que tienen la ventaja respecto a las baterías de que tienen un gran número de ciclos de carga y no necesitan un regulador que controle una posible sobrecarga.

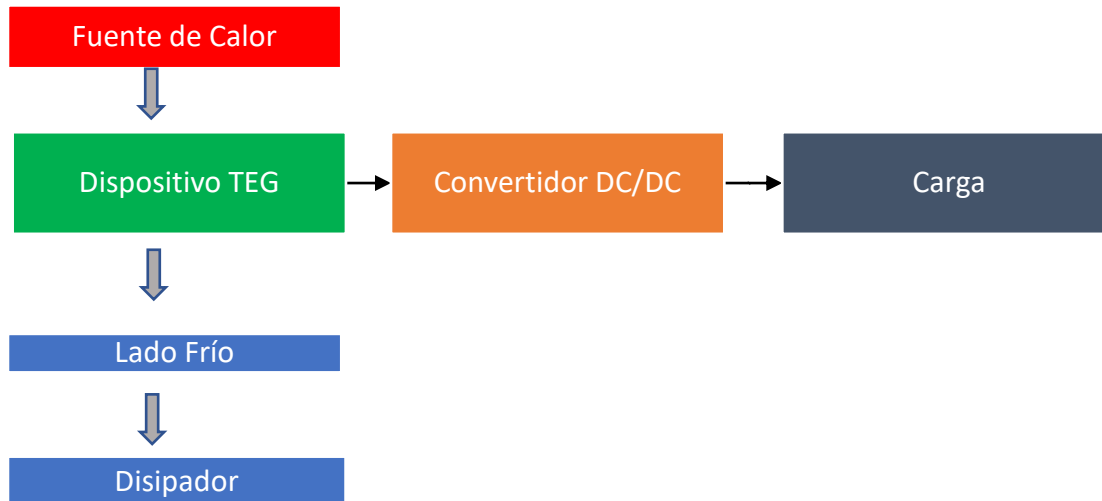


Figura 2. Diagrama de bloques básico de un sistema harvesting termoeléctrico

Un sistema termoeléctrico puede ser de mayor tamaño e incorporar muchos más componentes en función de la temperatura a la que está expuesto, la ubicación y la potencia generada. Para el objetivo de este proyecto sería únicamente necesario la utilización de los elementos básicos sin añadir otros que tengan partes móviles y que supongan una gran pérdida de energía.

1.2 Aplicaciones

Con el desarrollo de nuevos materiales se han realizado numerosos estudios durante la última década sobre la viabilidad del uso de generadores termoeléctricos en distintos entornos donde se desperdicia grandes cantidades de calor. Los nuevos conversores son capaces de soportar temperaturas más altas y son más eficaces con gradientes térmicos más pequeños.

Transporte

El sector automovilístico es uno de los medios donde más investigaciones se han desarrollado debido al calor residual que se desprende en el motor, el radiador y el tubo de escape. Los módulos termoeléctricos presentan una eficiencia del 5% pero eso no evita que ya estén implantados en algunos automóviles de grandes marcas ya que reducen la carga del alternador, mejorando la eficiencia del combustible, el cual se estima que se desaprovecha en torno al 40% en la mayoría de los vehículos, los cuales, hoy en día, incorporan una unidad de control y numerosos dispositivos electrónicos que mejoran la seguridad y la comodidad del usuario.

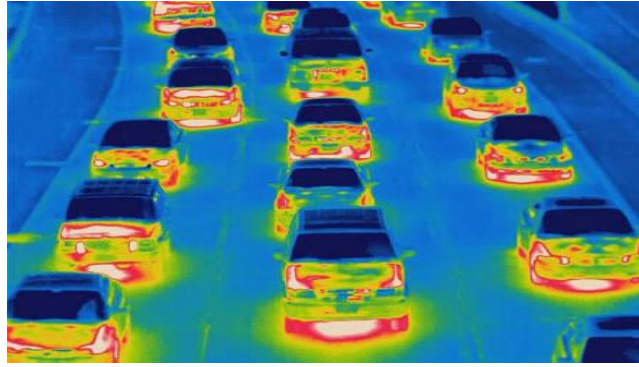


Figura 3. Automóviles como fuente de calor

Aprovechando el calor residual de un coche o cualquier otro vehículo de transporte, donde se alcanzan temperaturas entre 50°C y 250°C y en algunos casos hasta 1000°C , se puede alimentar cualquier luz indicadora, las luces del interior o cargar un teléfono con pequeños módulos como son las celdas peltier. Para poder generar más potencia aprovechando el calor residual o directamente sustituir al alternador, la ubicación del módulo generador puede ser un gran problema, ya que para asegurar un correcto funcionamiento es necesario el uso de intercambiadores de calor, material protector, sensores o ventiladores. Esto puede generar un exceso de peso y de tamaño, por lo que no siempre es viable su aplicación.

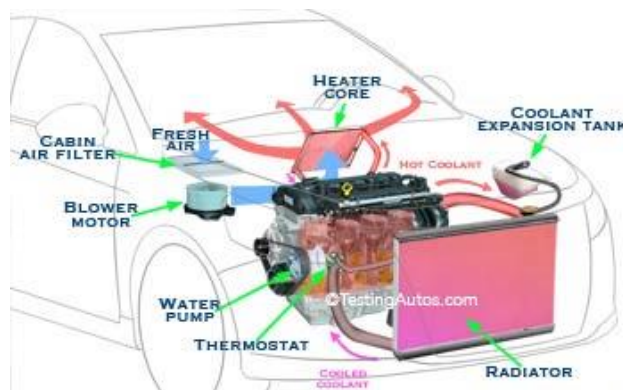


Figura 4. Componentes de un automóvil que expulsan calor

En los motores de avión o las turbinas de helicópteros donde se genera mucho calor, no se contempla el uso de TEG porque podría afectar al funcionamiento, sin embargo, el gradiente térmico entre el interior de la cabina y el exterior es suficiente para alimentar sensores de monitorización de la aeronave. En el sector náutico a pesar de el gran impacto ambiental y de disponer del agua como refrigerante no hay importantes desarrollos en el uso de TEG ya que el calor que se genera se utiliza para calentar alojamiento o para generar agua dulce. El uso de TEG sería interesante, al igual que en los aviones, para alimentar sensores inalámbricos de monitorización y seguridad (sensores de elongación, de humedad, anemómetros...) ubicados en zonas de difícil acceso. También es interesante para la iluminación en aguas profundas donde los cables no son viables o en exploraciones espaciales donde la energía solar es insuficiente y teniendo en cuenta que la temperatura exterior es de -200°C , con el desarrollo de los nuevos materiales ya no serían imprescindibles los generadores termoelectricos de radioisótopos empleados hasta ahora.

Industria

Otra gran fuente de calor es la industria. En las fábricas, donde hay motores, hornos, tuberías con fluidos calientes o las grandes chimeneas industriales, se suele usar el calor que expulsan como calefacción o para generar electricidad mediante turbinas de vapor.



Figura 5. Industria como fuente de calor (1)

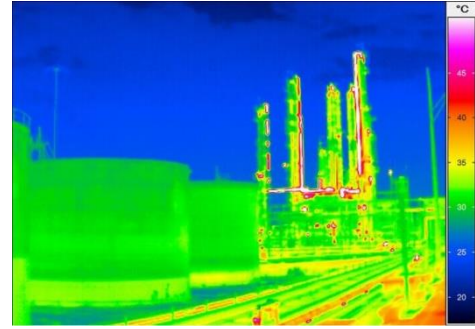


Figura 6. Industria como fuente de calor (2)

Sin embargo, siguen desperdiciando grandes cantidades de calor que se arrojan a la atmosfera. Con la implantación de módulos termoelectricos se pueden ahorrar al año unos cuantos miles de kW con la tecnología actual.

Dispositivos corporales

Los dispositivos biomédicos avanzan en su tecnología incrementando los datos que puede recoger lo que exige un aumento de consumo energético. Los TEG es una solución aprovechando el calor que desprende nuestro cuerpo constantemente. Mejoraran la movilidad al prescindir de cables y reducen el estrés adicional de tener siempre cargadas las baterías de algunos dispositivos esenciales o de cirugías para su reemplazo. Además, un sistema de monitorización permite al personal médico seguir la evolución del paciente remotamente, una solución para evitar el desplazamiento de una población cada vez más anciana.

Actualmente, se estudia la implantación de pequeños módulos termoelectricos en el tejido de la superficie corporal donde hay un gradiente térmico de 1-5°C entre músculo, grasa y epidermis.

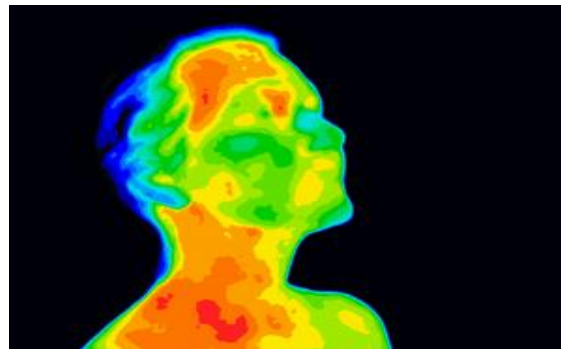


Figura 7. Calor desprendido por una persona

Puede ser insuficiente pero utilizables como apoyo energético para dispositivos como electroencefalogramas, electrocardiogramas, sensores de nivel de oxígeno o de seguimientos de determinados tejidos que consumen μW o en algunos casos unos pocos mW. Además, necesitan una amplificación de señal, un microcontrolador y un transmisor.

También se ha desarrollado prendas de vestir o adhesivos que aprovechan el calor que se desprende a través de la piel.



Figura 8. Ejemplo de conversor termoelectrico wearable (1)



Figura 9. Ejemplo de conversor termoelectrico wearable (2)

Esta tecnología también podría utilizarse para alimentar la pila de un reloj de pulsera, para los numerosos dispositivos *wearable* que están surgiendo durante la última década o para el rastreo y control de animales.

Zonas geográficas de difícil acceso o países en desarrollo

En muchas zonas del planeta es indispensable disponer de sistemas de generación autónoma. Los accidentes geográficos hacen que muchas veces la instalación de líneas de transmisión sea imposible o muy costosa. También es frecuente que se produzcan cortes de luz en aquellos países en desarrollo donde la red eléctrica es inestable.

En estos lugares se utiliza principalmente la biomasa para calentar los hogares y para cocinar. Hoy en día ya existen diseños de TEG que alimentan extractores eléctricos (consumo medio entre 100W y 200W) que mejoran la eficiencia del combustible usado, para cargar teléfonos móviles o para iluminación. También es una alternativa a los cortes de luz que se producen durante periodos invernales en muchas poblaciones montañosas.

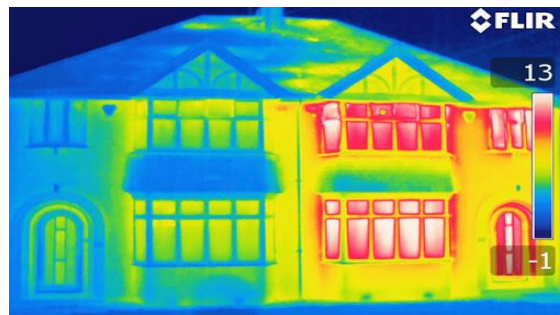


Figura 10. Calor desprendido en una vivienda

Además del calor del fuego de las estufas, se puede aprovechar el gradiente térmico entre el interior de una habitación y la temperatura de la superficie de una ventana, que dependiendo de la temperatura exterior puede haber una diferencia térmica considerable como para poder generar electricidad.

Ventajas de las células peltier como elementos de harvesting

Las células peltier que se van a emplear son pequeños módulos termoelectricos capaces de generar unos pocos de watios. Se pueden utilizar como principal suministro para determinados dispositivos o como apoyo energético a otro tipo de generadores.

Su principal ventaja es la durabilidad, de 20 a 30 años. Al no tener partes móviles no necesita un mantenimiento. Por esta razón son idóneas para alimentar muchos de los sensores y actuadores

comentados anteriormente. Estos dispositivos consumen tan poca energía que no es práctico utilizar largos cables para alimentarlos. Las pilas convencionales tienen menos durabilidad que los sensores por lo que su recambio puede ser una tarea difícil, ya que suelen estar en zonas de difícil acceso e incluso peligrosas, por ejemplo, en instalaciones químicas, nucleares o militares.

Además de su aplicación en sistemas de monitorización y vigilancia en la industria y el transporte (principalmente en automóviles), también son útiles en cualquier edificio para alimentar sensores de humedad, luces emergencia o para la monitorización del gas doméstico. En un edificio se puede aprovechar el mismo calor del interior o las tuberías por donde fluye el agua caliente.

Otra aplicación interesante de las celdas peltier es como generador portátil para alimentar dispositivos portátiles en expediciones y acampadas: sistemas de iluminación, dispositivos radiofónicos o incluso un smartphone, dependiendo de la intensidad de la fuente de calor y el número de celdas (el consumo medio de un smartphone durante la carga es de 10 a 20W).

Son numerosos los entornos donde existe la posibilidad de recolección de grandes cantidades de calor, pero la eficiencia de los actuales materiales termoeléctricos hace que sea inviable utilizar TEG como fuente principal de energía de dispositivos con grandes consumos. Por esta razón el proyecto está orientado a alimentar electrónica portátil de bajo consumo. Lo más complicado es encontrar un gradiente térmico que se ajuste al pico de rendimiento del material.

1.3 Objetivo del proyecto

Se va a desarrollar una simulación en el entorno MATLAB que permita analizar la viabilidad del uso de las celdas peltier.

Se estudiará en balance energético en diferentes configuraciones de la peltier.

Se estudiará la electrónica de potencia que mejor se ajuste a la celda peltier con el objetivo de acondicionar y optimizar su funcionamiento.

Capítulo 2

2 Principios básicos de la termoelectricidad

La termoelectricidad, tal y como su nombre indica, es la conversión entre la energía térmica y la energía eléctrica y viceversa proporcionando una alternativa para la generación de energía y la refrigeración.

Su descubrimiento data de 1821 cuando Thomas J. Seebeck se percató que la dirección de una brújula colocada entre la unión de dos metales distintos se desviaba si se aplicaba una fuente de calor a uno de los extremos. Esa desviación fue consecuencia de la generación de un campo electromagnético al producirse un potencial eléctrico (voltaje) que puede conducir una corriente eléctrica en un circuito cerrado.

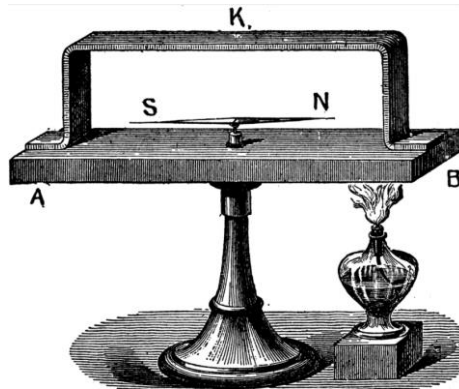


Figura 11. Demostración de Thomas J. Seebeck del efecto Seebeck

Más tarde, en 1834, C. A. Jean Peltier observó que el efecto Seebeck es reversible y en 1851, William Thomson justifica los dos efectos.

El funcionamiento de la termoelectricidad no se terminó de entender completamente hasta el descubrimiento de los electrones al final del siglo 19.

Historia reciente:

Desde el principio del siglo XX, la Unión Soviética y principalmente Estados Unidos, investigaron en termogeneradores mientras que en Europa se centraron en la refrigeración.

Durante la segunda guerra mundial los soviéticos ya disponían de generadores termoeléctricos que producían 2-4 vatios aprovechando el calor de las hogueras, pero hasta mediados de siglo no se produjeron grandes avances en los semiconductores, lo que supuso una gran evolución y que otros países como Japón, comenzaran a investigar esta tecnología.

Esta evolución continuó hasta la década de los 60 con la participación de numerosas empresas en la investigación termoeléctrica. Se comenzaron a utilizar marcapasos que se alimentaban mediante generadores termoeléctricos. Como fuente de calor se empleaba plutonio-238 de forma segura.

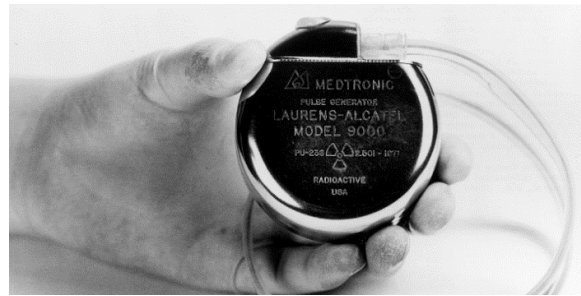


Figura 12. Modelo de marcapasos con pu-238

El pu-238 es un isótopo que irradia calor en su descomposición y al que se limitaba la irradiación para que no fuera perjudicial para la salud. Su vida útil es de 82 años, mucho más que las baterías empleadas hasta entonces, las cuales se tenían que cambiar cada año. Aunque la irradiación estuviera controlada, debido a su posible toxicidad se dejaron de usar cuando aparecieron las baterías Li-Ion. Además, el pu-238 ha tenido una gran importancia hasta la actualidad en expediciones espaciales donde se requiere una fuente térmica para generador termoeléctrico de radioisótopos (RTG) durante un largo periodo de tiempo.



Figura 13. Generador termoeléctrico de radioisótopos (RTG)

Aunque los generadores termoeléctricos hayan sido útiles en entorno hostiles, misiones de la NASA o aplicaciones médicas hasta hoy en día, el interés en su uso decrementó por su poca eficiencia en comparación con otras técnicas. Durante décadas, la termoelectricidad ha estado presente mayoritariamente en el ámbito de la refrigeración.

Sin embargo, desde principios de siglo con la llegada de nuevos materiales con mayor rendimiento se han desarrollado módulos que permiten generar electricidad con mayor eficiencia aprovechando el calor residual convirtiendo a la termoelectricidad como una alternativa de fuente energética ecológica ya que realiza una conversión directa calor-electricidad.

2.1 Efectos termoeléctricos

Para entender el funcionamiento de los termogeneradores es importante conocer los tres fenómenos en los que se fundamenta la termoelectricidad.

2.1.1 Efecto Seebeck

Se basa en la generación de una diferencia de potencial cuando en las uniones de dos conductores distintos conectados en serie, se aplican dos temperaturas diferentes. El efecto Seebeck es el

principio de funcionamiento de un termopar. La Figura 14 muestra un esquema básico de este transductor.

Este efecto aparece debido a la difusión térmica que provoca el movimiento de los portadores de carga (electrones y huecos) a través (o contra) la diferencia de temperatura, en los conductores.

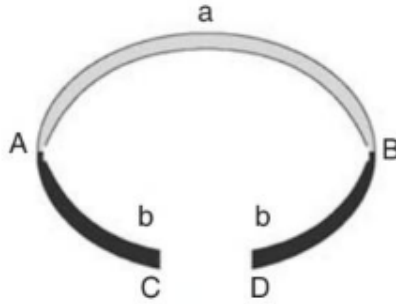


Figura 14. Esquema básico de un termopar

Fuente: Thermoelectric Handbook: Macro to Nano [3]

Por lo tanto, la diferencia de potencial generada en circuito abierto (V_{oc}) en función de la diferencia de temperatura (ΔT) viene dada por:

$$V_{oc} = \alpha \cdot \Delta T = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_H - T_C) \quad (1)$$

T_H y T_C son las temperaturas aplicadas en la unión caliente y la unión fría y α_A y α_B , los coeficientes Seebeck de cada conductor. La diferencia entre estos dos define el coeficiente Seebeck de un material, su símbolo es α , aunque también se representa como S . Sus unidades son [V/K]. Su rango habitual de magnitud es desde microvoltios a milivoltios por grado Kelvin.

La tensión medida es aproximadamente lineal a la diferencia de temperatura ya que a pesar de que el coeficiente Seebeck no sigue un comportamiento lineal, cuando los rangos de temperatura no son muy grandes, se puede hacer una simplificación.

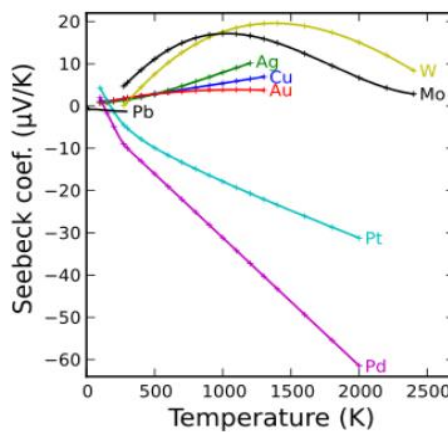


Figura 15. Variación del coeficiente Seebeck en varios metales

El signo de α dependerá del tipo de portadores que conducen la corriente eléctrica. Si se trata de electrones (e^-), el signo del coeficiente es negativo. Si es de huecos (h^+), positivo.

El coeficiente Seebeck determinará el rendimiento de un material termoeléctrico, cuanto mayor sea, más grande será la conversión de energía.

2.1.2 Efecto Peltier

Es el efecto contrario al efecto Seebeck. Si en un circuito formado por la unión de dos conductores diferentes establecemos una corriente eléctrica, una de las uniones produce calor y la otra absorbe.

El efecto Peltier se genera cuando los e- pasan de un conductor a otro con mayor estado de energía. El e- necesita desprenderse de energía que se transformará en calor (Efecto Joule). En el sentido contrario, los e- absorben calor enfriando la unión.

La ratio de calor absorbido o producido por unidad de tiempo, $q = dQ/dt$, en una de las uniones será igual a:

$$\frac{dQ}{dt} = (\pi_A - \pi_B) * I \quad (2)$$

Siendo π_A y π_B los coeficientes peltier de los conductores e I , la corriente eléctrica.

2.1.3 Efecto Thomson

El último de los efectos termoeléctricos relaciona la tasa de generación de calor reversible (q) que resulta del paso de corriente a lo largo de una porción de un solo conductor en el cual hay una diferencia de temperatura, ΔT :

$$q = \beta I \Delta T \quad (3)$$

β es el coeficiente Thomson. Sus unidades son como las del efecto Seebeck, V/K, pero su transcendencia es menor.

2.1.4 Relaciones Kelvin

William Thomson (Lord Kelvin) relacionó el comportamiento de los tres efectos anteriores de la siguiente manera:

Primera relación Thomson (relación entre Seebeck y Peltier):

$$\alpha_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T} \quad (4)$$

Segunda relación Thomson (entre Seebeck y Thomson, para medios isotrópicos):

$$\frac{d\alpha_{ab}}{dT} = \frac{\beta_a - \beta_b}{T} \quad (5)$$

Capítulo 3

3 Material termoeléctrico

La búsqueda de nuevos materiales para el desarrollo de este tipo de tecnología es uno de los grandes objetivos por parte de los fabricantes. En los últimos años han desarrollado materiales con mejoras en eficiencia.

3.1 Rendimiento. Figura de Mérito

Para describir el rendimiento de un material a una determinada temperatura se utiliza la figura de mérito termoeléctrica ($Z [K^{-1}]$). En la práctica se define como:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} = \frac{\alpha^2 \cdot \theta}{k} \quad (6)$$

Su valor dependerá del coeficiente Seebeck y de las propiedades físicas de transporte del material: la conducción eléctrica ($\theta [S \cdot cm]$) y la conducción térmica, que se representa como k o λ y sus unidades son $W/cm \cdot K$. A lo largo de este trabajo se utilizará k .

En muchos cálculos se utiliza la resistividad eléctrica. ($\rho [\Omega \cdot cm]$). Un valor alto de resistividad de un material indica que es un mal conductor ($\rho = 1/\theta$).

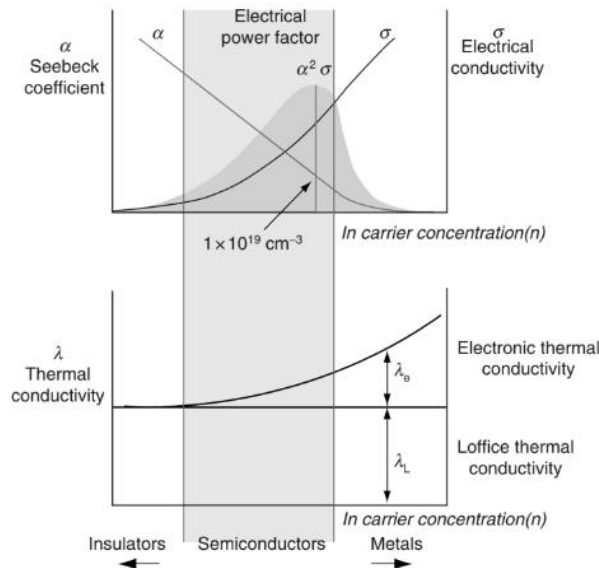


Figura 16. Variación de las propiedades termoeléctricas en aislantes, semiconductores y metales.

Fuente: Thermoelectric Handbook: Macro to Nano [3]

En un metal, la conductividad eléctrica es muy alta mientras que en un aislante es prácticamente cero. Sin embargo, los aislantes son los que menor conductividad térmica presentan y los metales los que más. La conductividad de un semiconductor está entre ambos, no son aislantes perfectos ni conductores por excelencia, por esta razón, son los materiales más utilizados en la termoelectricidad.

3.2 Tipos de semiconductores

Los semiconductores poseen una estructura cristalina, en su mayoría de silicio seguido del germanio. El silicio es el más utilizado por su abundancia, fácil manipulación y comportamiento eléctrico muy estable.

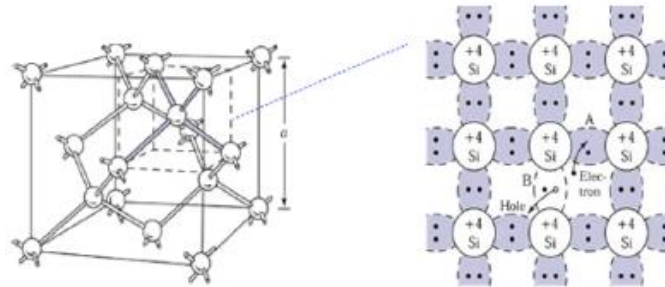


Figura 17. Estructura cristalina del silicio

Fuente: Diapositivas de la asignatura Tecnología Electrónica, Universidad de Alcalá [9]

Existen dos grupos de semiconductores, intrínsecos (puro, de un solo átomo) y extrínsecos.

El semiconductor intrínseco es aquel que no da lugar a huecos y electrones libres, comportándose como un aislante perfecto a temperatura ambiente. Un aumento de temperatura puede ocasionar la ruptura de enlaces covalentes de la estructura cristalina, generando electrones libres.

El semiconductor extrínseco, es el resultado de cuando al semiconductor intrínseco puro se le añaden impurezas, comúnmente conocido como dopantes, introduciendo átomos de otros elementos con el fin de mejorar la conductividad.

Según el tipo de dopaje serán tipo N o tipo P.

Tipo N: Se denomina N por “*Negative*” debido al exceso de electrones tras un proceso de dopaje aumentando el número de este tipo de portadores de carga eléctrica.

Tipo P: en este caso, P por “*Positive*”. Se añaden átomos que aumentan los “huecos”, portadores positivos.

3.3 Propiedades termoeléctricas

Las propiedades eléctricas y térmicas determinan el rendimiento de un material. Su valor varía de forma no lineal en función de la temperatura.

Para manejar valores constantes de α , θ y λ y así simplificar los cálculos, muchos modelos analíticos utilizan propiedades independientes de la temperatura. Los valores tipo p y tipo n se obtienen a partir de la temperatura media en la unión caliente y la unión fría ($T_{avg} = \frac{T_H + T_C}{2}$).

$$\alpha = \overline{\alpha_p} - \overline{\alpha_n} \quad (7)$$

$$\theta = \overline{\theta_p} + \overline{\theta_n} \quad (8)$$

$$\rho = \overline{\rho_p} + \overline{\rho_n} \quad (9)$$

$$k = \overline{k_p} + \overline{k_n} \quad (10)$$

Además, en la información sobre el material que proporcionan algunos fabricantes de módulos termogeneradores, encontramos que la magnitud de tipo p y de tipo n son aproximadamente iguales:

$$\overline{\alpha_p} \simeq -\overline{\alpha_n} \quad (11)$$

$$\overline{\theta_p} \simeq \overline{\theta_n} \quad (12)$$

$$\overline{\rho_p} \simeq \overline{\rho_n} \quad (13)$$

$$\overline{k_p} \simeq \overline{k_n} \quad (14)$$

Utilizando propiedades eléctricas y térmicas independientes de la temperatura, se consiguen resultados muy aproximados a la respuesta real. Sin embargo, si se requieren cálculos o simulaciones aún más precisos con rangos de temperaturas muy grandes, cabe la posibilidad de que los resultados sean sobreestimados. Por esta razón, en este trabajo se van a aplicar modelos no lineales dependientes de la temperatura.

Existen diferentes fórmulas el cálculo de propiedades termoeléctricas. La técnica que mejor describe las características medidas de un material es por el método de mínimos cuadrados no lineales.

Los parámetros de materiales termoeléctricos se pueden expresar como un polinomio cuadrático de temperatura:

$$\text{parámetro} = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2. \quad (15)$$

Los coeficientes tipo n y tipo p de cada parámetro pueden ser diferentes en valor y signo

$$\alpha_{p,n} = \alpha_{0p,n} + \alpha_{1p,n} \cdot t + \alpha_{2p,n} \cdot t^2 \quad (16)$$

$$k_{p,n} = k_{0p,n} + k_{1p,n} \cdot t + k_{2p,n} \cdot t^2 \quad (17)$$

$$\theta_{p,n} = \theta_{0p,n} + \theta_{1p,n} \cdot t + \theta_{2p,n} \cdot t^2 \quad (18)$$

La Figura 18 es una captura del Datasheet proporcionado por el fabricante *European Thermodynamics Limited* donde se detalla como calcular las propiedades termoeléctricas del Telururo de Bismuto.

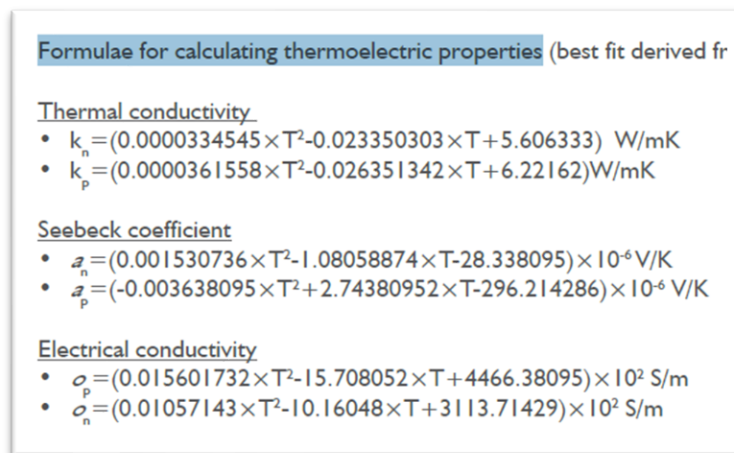


Figura 18. Ecuaciones para el cálculo de las propiedades termoeléctricas

Estos coeficientes serán los utilizados en la simulación de las celdas peltier ya que el Teluro de Bismuto es el utilizado por la mayoría de ellas.

3.4 Material convencional

El semiconductor más comercializado es el Teluro de Bismuto (Bi_2Te_3). A pesar de que su coeficiente Seebeck no es muy alto, ofrece un gran rendimiento de 25°C a 125°C. El Bi_2Te_3 tiene una alta conducción eléctrica y una conductividad térmica muy baja. La gran desventaja de este semiconductor es la temperatura máxima que soporta, en torno a los 230°C.

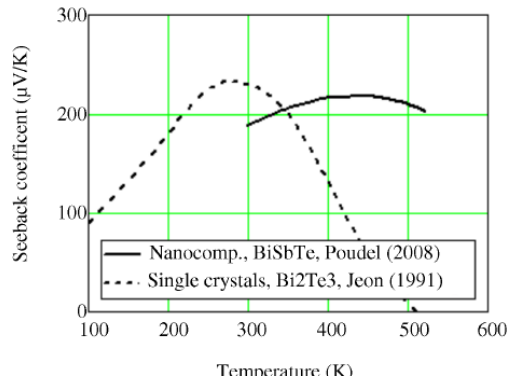


Figura 19. Variación del coeficiente Seebeck del BiSbTe y Bi₂Te₃

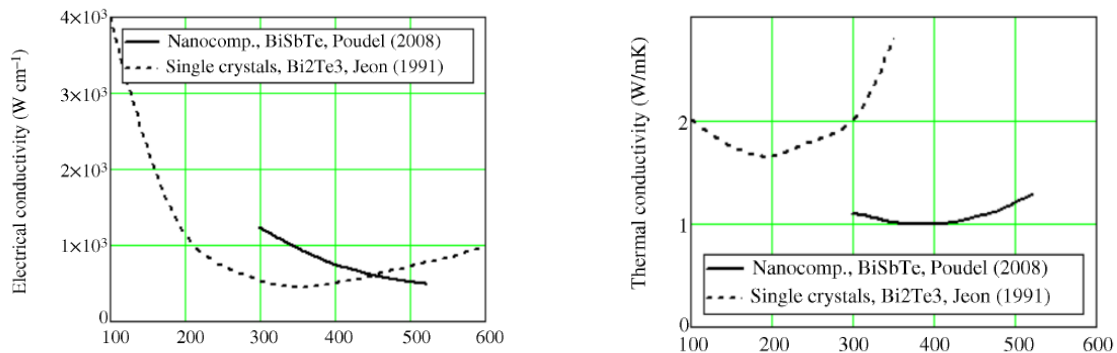


Figura 20. Variación de la conductividad térmica del BiSbTe y Bi₂Te₃

Figura 21. Variación de la conductividad eléctrica del BiSbTe y Bi₂Te₃

Fuente: Thermoelectrics: Design and Materials [12]

Otros materiales convencionales que podemos encontrar para ese rango de temperaturas son aleaciones de Bismuto, por ejemplo, Bismuto con Selenio (Bi_2Se_3).

Para temperaturas más altas, alrededor de 575°C, los fabricantes utilizan aleaciones de plomo.

El Teluro de Plomo (PbTe) es el más utilizado como generador termoeléctrico debido a que puede soportar temperaturas más altas que el Bi_2Te_3 .

Los materiales que soportan más temperatura están fabricados a base de aleaciones de bismuto-germanio y silicio-germanio. Su rango de temperaturas máximas es en torno a 1000°C

La Tabla 1 recoge la figura de mérito de alguno de los semiconductores más típicos. (fuente: *Thermal Design_Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells* [13])

Tabla 1. Figura de Mérito de algunos semiconductores típicos

Material	Type	Temperature (°C)	Figure of merit Z (K^{-1})
Bi_2Te_3	p	25	2.5×10^{-3}
Bi_2Te_3	n	25	2.5×10^{-3}
$SbBiTeSe$	p	70	3.0×10^{-3}
$Bi-SbTe$	p	150	2.5×10^{-3}
$Bi_2Te_3-74Sb_2Te_3$	n	150	3.0×10^{-3}
$Bi_2Te_3-25Bi_2Se_3$	p	150	2.7×10^{-3}
$PbTe$	n, p	450 (325–625)	1.3×10^{-3}
$ZnSb$	p	175	1.4×10^{-3}
$SiGe$	p	1,000	0.4×10^{-3}
$SiGe$	n	1,000	0.8×10^{-3}
$GeTe$	p	450	1.7×10^{-3}
$MnTe$	p	900	0.4×10^{-3}
$CeS_{1.4}$	n	1,100	1.8×10^{-3}
$AgSbTe_2$	p	400	1.3×10^{-3}
$InAs$	n	700	0.7×10^{-3}

En las características de un material se suele especificar el valor de figura de mérito para una determinada temperatura, ZT , siendo $T = T_{avg}$.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} T_{avg} = \frac{\alpha^2 \cdot \theta}{k} T_{avg} \quad (19)$$

La Tabla 2 además de la figura de mérito, recoge las propiedades eléctricas de los semiconductores más utilizados. (fuente: *Thermoelectrics: Design and Materials. Appendix E Thermoelectric Properties* [12])

Tabla 2. Propiedades termoeléctricas de la mayoría de los semiconductores actualizados

	Type	Temperature (K)	$ z $ ($\mu V/K$)	σ (Ωcm) ⁻¹	k_e (W/mK)	k (W/mK)	ZT	
Bi_2Te_3	p-type single crystals	300	230	500	0.6	2.0	0.5	Jeon et al. (1991) [1]
$BiSbTe$	p-type, nanocomposites	400	220	700	0.6	1.0	1.4	Poudel et al. (2008) [2]
$Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$	n-type nanocomposites	400	210	700	0.6	1.2	1.0	Yan et al. (2010) [3]
$PbTe-SrTe$	p-type nanocomposites	900	270	300	0.4	1.1	2.2	Biswas et al. (2012) [4]
$Si_{70}Ge_{30}$	n-type single crystals	1000	350	320	0.5	4.0	0.8	Dismukes et al. (1964)[5]
$Si_{80}Ge_{20}$	n-type nanocomposites	1200	250	400	0.5	2.8	1.3	Wang et al. (2008) [6]
$CoSb_3$	n-type single crystals	800	240	800	0.5	4.0	0.6	Caillat et al. (1996) [7]
$Yb-CoSb_3$	n-type, Yb-filled skutterudites	800	200	1600	2.0	3.2	1.3	Tang et al. (2015) [8]
$Yb_{14}MnSb_{11}$	p-type, zintl compound	1200	190	200		0.7	1.1	Brown et al. (2006) [9]
La_3Te_4	n-type single crystals	1200	280	80	0.3	0.7	1.1	May et al. (2010) [10]

Si un material tiene $ZT > 0.5$, se considera apto para la termoelectricidad. Los materiales con $ZT \geq 1$, desarrollados durante los últimos 20 años, se consideran un buen material.

Para mejorar el ZT , los fabricantes se centran en la temperatura de operación en las que se pueden tener buenas propiedades además del uso de materiales de bajo coste para compensar la baja eficiencia.

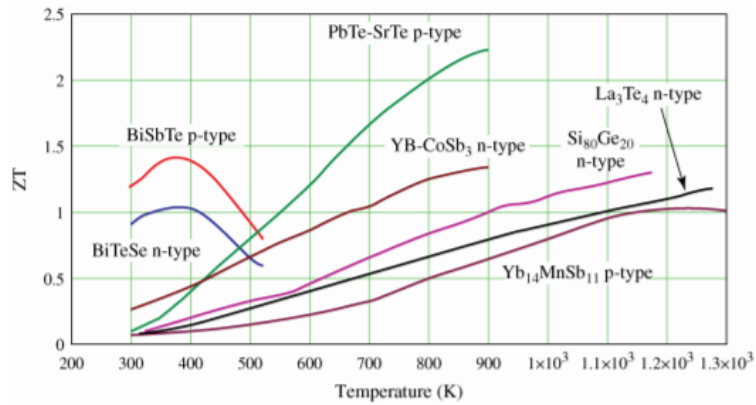


Figura 22. Variación de ZT en varios materiales

Fuente: Thermoelectrics: Design and Materials [12]

La Figura 22 representa las curvas de ZT de distintos materiales frente a la temperatura. Algunos como La_3Te_4 presentan un gran rango de funcionamiento y su valor de ZT aumenta proporcionalmente a la temperatura. Otros como BiTeSe o BiSbTe con un margen de funcionamiento mucho menor, disminuye su valor para temperatura mayores a 400K . El $\text{PbTe} - \text{SrTe}$ destaca por tener $ZT_{\text{max}} = 2.2$ y capaz soportar hasta 900K .

Como vemos, la elección de un material u otro por parte de los fabricantes viene determinada por el parámetro ZT según la aplicación del módulo termoeléctrico.

Capítulo 4

4 Análisis de la celda peltier

Las celdas peltier, también conocidas como módulos o células Peltier se utilizan principalmente como refrigeradores termoeléctricos, aunque en los últimos años ha aumentado la oferta de celdas peltier orientadas a generar electricidad. Anteriormente, los dispositivos termogeneradores eran un componente integrante de un sistema diseñado para una aplicación específica.

Su característica principal es que pueden aprovechar cualquier diferencia de temperatura entre sus dos caras para generar electricidad. Esta flexibilidad para beneficiarse de distintas fuentes de calor y el hecho de que no emitan gases y no sufran reacciones químicas hace que sea una fuente de energía totalmente limpia. Además, al no tener partes móviles que no requieren un mantenimiento, su desgaste es bajo y por lo tanto tienen una gran durabilidad.

Otras ventajas es que son compactos, no ocupan mucho espacio y pesan muy poco.

Los gradientes de temperatura de nuestro entorno no sufren grandes variaciones de modo que las celdas peltier proporcionan energía de forma continua. Sin embargo, es necesario el empleo de disipadores de calor debido al flujo de calor que se produce entre ambas superficies de la celda por diferentes fenómenos físico que se analizarán detalladamente.

4.1 Elementos de una celda peltier

Las celdas peltier están formadas básicamente por un conjunto de termopares, uniones de semiconductores tipo p y n, conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Estos están aislados por placas de cerámica que sirven de base y proporcionan una buena conductividad térmica.

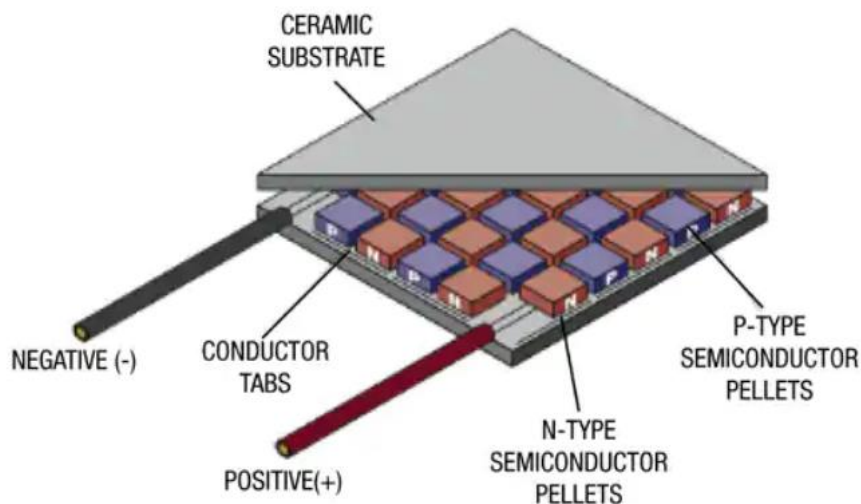


Figura 23. Componentes de un módulo peltier

Los semiconductores de tipo n tendrán un coeficiente Seebeck negativo y un exceso de electrones libres y en los semiconductores de tipo p será positivo y tendrán exceso de huecos.

El coeficiente Seebeck de cada termopar será

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (20)$$

Para calcular el coeficiente Seebeck total de una celda peltier se multiplica α por el número de termopares.

$$S = n \cdot \alpha \quad (21)$$

La resistencia interna total de la celda (R_{in}) será la suma de resistencias eléctricas (R_e) del conjunto de termopares. La resistencia de un termopar depende de la resistividad eléctrica del material termoeléctrico (ρ) y de sus dimensiones, es decir, de su espesor (L_{tem}) y área (A_{tem}), (considerando que las dimensiones del semiconductor tipo p son las misma que las del semiconductor tipo n).

$$R_{in} = n \cdot \rho \cdot \frac{L_{tem}}{A_{tem}} = n \cdot (\rho_p + \rho_n) \cdot \frac{L_{tem}}{\frac{A_{tem}}{2}} = n \cdot \left(\frac{1}{\sigma_p} + \frac{1}{\sigma_n} \right) \cdot \frac{L_{tem}}{\frac{A_{tem}}{2}} \quad (22)$$

Por lo general, las bases cerámicas son de alúmina (óxido de aluminio, Al_2O_3) y los termopares están conectados con Cobre (Cu)

El cobre es conocido por ser un gran conductor eléctrico y presenta una alta conductividad térmica $k_{Cu} = 401 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. La alúmina es un buen aislante eléctrico, soporta altas temperaturas y tiene alta conductividad térmica. Su conductividad termal es aproximadamente $31 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (no sufre grandes variaciones frente a la temperatura). Tiene una densidad de 3220 kg/m^3 y calor específico $419 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$. El calor específico define la cantidad de calor por unidad de masa necesaria para elevar la temperatura. Este parámetro determinará la velocidad con la que aumenta de temperatura en la cara fría cuando comience a expulsar calor la celda peltier.

La conductancia termal de la celda peltier (C , en muchos textos también se representa como K) es la suma de conductancias termales de los componentes de la celda (termopares, bases cerámicas y cobre).

$$C = \left(\frac{1}{C_{tem}} + \frac{1}{C_{bases}} + \frac{1}{C_{cu}} \right)^{-1} \quad (23)$$

Siendo

$$C_{tem} = n \cdot k_{tem} \frac{A_{tem}}{L_{tem}} \quad (24)$$

$$C_{base} = k_{bas} \frac{A_{bas}}{L_{bas}} \quad (25)$$

$$C_{cu} = k_{cu} \frac{A_{cu}}{L_{cu}} \quad (26)$$

La conductancia termal del cobre se despreciará para el cálculo de la Conductancia termal total, ya que $C_{cu} \approx 1000 \cdot C_{tem}$.

4.2 Análisis de la celda peltier como generador termoeléctrico

4.2.1 Potencia generada

Si se conecta una carga, R_L , en los terminales de salida de la celda, se crea un circuito eléctrico (Figura 24).

A partir de este circuito podemos calcular la potencia total que una celda peltier transfiere a la carga. La potencia generada debe cumplir la 1ª ley de la termodinámica de la conservación de la energía.

$$W = I \cdot V = I^2 R_L \quad (27)$$

$$W = (Q_h - Q_c) \quad (28)$$

V es la suma de tensiones que produce cada termopar, $V = n\alpha(T_H - T_C)$, e I la corriente que circula por el circuito.

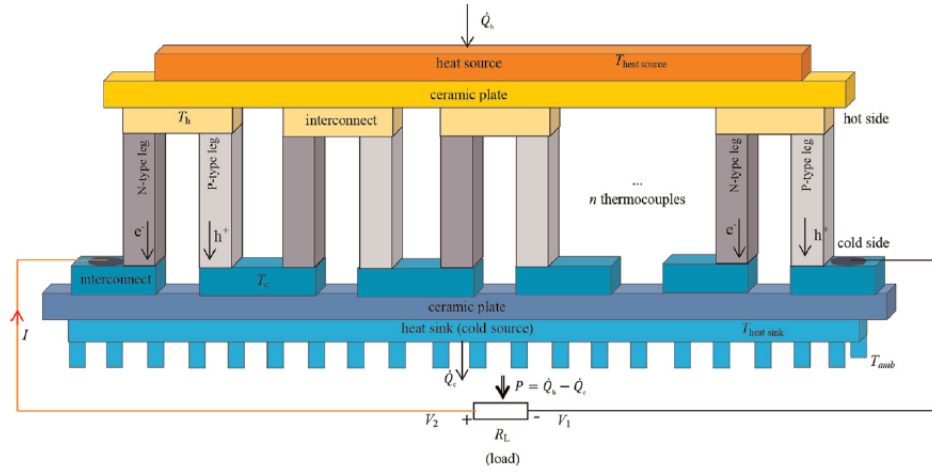


Figura 24. Esquema eléctrico de un módulo peltier con una carga conectada

Fuente: Thermoelectric Energy Harvesting Basic Principles and Applications [5]

Q_h es el calor absorbido por en la superficie caliente y Q_c es el calor que se expulsa, es decir, el transferido a la superficie fría.

El cálculo de Q_h y Q_c vendrá determinado por la conducción térmica, el efecto Joule y el efecto Peltier.

El efecto Thomson, $\beta = \frac{d\alpha}{dT}$, es despreciable al ser muy pequeño en comparación con los otros fenómenos.

Haciendo uso de las relaciones Thomson (4), el calor por efecto Peltier producido o absorbido (dependiendo de la superficie) es

$$Q_{in} = n\alpha T_H I \quad (29)$$

$$Q_{out} = n\alpha T_C I \quad (30)$$

El efecto Joule aparece cuando una corriente eléctrica circula por un conductor. Parte de la energía de los electrones se transforma en calor cuando estos chocan con los átomos del material. Este efecto lo describe la siguiente ecuación:

$$Q_j = I^2 R_{in} \quad (31)$$

El flujo de calor correspondiente a la conducción termal depende de la conductancia termal de la celda y de la diferencia de temperatura existente entre las caras.

$$Q_{th} = C(T_H - T_C) \quad (32)$$

Por lo tanto, la tasa de calor absorbido será

$$Q_h = n\alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R_{in} + C(T_H - T_C) \quad (33)$$

Y el calor expulsado

$$Q_c = n\alpha T_C I + \frac{1}{2} I^2 R_{in} + C(T_H - T_C) \quad (34)$$

A partir de las expresiones (28), (33) y (34) la potencia generada por la celda es

$$W = n\alpha I(T_H - T_C) - I^2 R_{in} \quad (35)$$

Y la corriente eléctrica que circula

$$I^2 R_L = n\alpha I(T_H - T_C) - I^2 R_{in} \quad (36)$$

$$I = \frac{n\alpha(T_H - T_C)}{R_L + R_{in}} \quad (37)$$

La corriente será inversamente proporcional a la suma de la resistencia de carga y de la resistencia eléctrica. Esto supone que a mayor carga menos flujo de calor se transfiere a la superficie fría debido a los efectos Joule y Peltier.

La tensión de salida será la suma de las tensiones que genera cada termopar conectados en serie por el efecto Seebeck menos la que se pierde por la resistencia interna del módulo, es decir la resistencia eléctrica del conjunto de termopares.

$$V_o = n\alpha(T_H - T_C) - I R_{in} \quad (38)$$

Utilizando la ecuación (37), V_o se puede expresar como

$$V_o = \frac{n\alpha(T_H - T_C)}{R_L + R_{in}} R_L \quad (39)$$

La siguiente figura representa el circuito eléctrico equivalente de una célula peltier

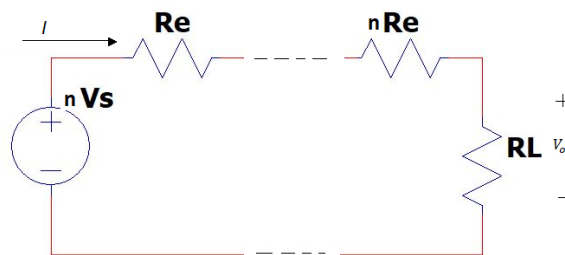


Figura 25. Circuito eléctrico equivalente de una célula peltier

La corriente con la salida cortocircuitada de este circuito será

$$I_{sc} = \frac{n\alpha(T_H - T_C)}{R_{in}} \quad (40)$$

Y la tensión con salida en circuito abierto ($I = 0$)

$$V_{oc} = n\alpha(T_H - T_C) \quad (41)$$

La máxima transferencia de potencia a la salida, en condiciones ideales, será cuando la carga sea igual a la resistencia del generador, $R_L = R_{in}$.

$$I_{max} = \left(\frac{n\alpha(T_H - T_C)}{2R_{in}} \right) \quad (42)$$

$$W_{max} = I^2 R_L = \left(\frac{n\alpha(T_H - T_C)}{2R_{in}} \right)^2 R_L = \frac{(n\alpha(T_H - T_C))^2}{4R_{in}} \quad (43)$$

4.2.2 Eficiencia energética

Si se considera un generador termoeléctrico ideal, la eficiencia térmica de la célula peltier, η_t , será la relación entre la potencia entregada a la carga conectada y la tasa de calor absorbido en el lado caliente.

$$\eta_t = \frac{W}{Q_h} = \frac{I^2 R_L}{Q_h} \quad (44)$$

Usando las expresiones (28) y (33) y considerando valores constantes para α , ρ y k se puede expresar como

$$\eta_t = \frac{\left(\frac{n\alpha(T_H - T_C)}{R_L + R_{in}} \right)^2 R_L}{n\alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R_{in} + C(T_H - T_C)} \quad (45)$$

De acuerdo con las expresiones vistas hasta ahora:

$$\eta_t = \eta_c \frac{\frac{R_L}{R_e}}{\left(1 + \frac{R_L}{R_{in}} \right) - \frac{\eta_c}{2} + \frac{\left(1 + \frac{R_L}{R_{in}} \right)^2}{ZT_H}} \quad (46)$$

Siendo $\eta_c = \frac{T_H - T_C}{T_H}$ la eficiencia de Carnot.

La eficiencia cuando la transferencia de potencia es máxima ($R_L = R_{in}$) es

$$\eta_{mp} = \frac{\eta_c}{2 - \frac{\eta_c}{2} + \frac{4}{ZT_H}} \quad (47)$$

Para conocer la eficiencia de conversión máxima se deriva η_t respecto a $\frac{R_L}{R_{in}}$ y se iguala a cero. Después de esta operación se obtiene:

$$\frac{R_L}{R_{in}} = \sqrt{1 + Z \frac{T_H + T_C}{2}} = \sqrt{1 + Z \cdot T_{avg}} \quad (48)$$

Por lo tanto

$$\eta_{mc} = \eta_c \frac{\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avg}} + \frac{T_c}{T_H}} \quad (49)$$

Con esta expresión podemos calcular la eficiencia de conversión máxima de la celda peltier para distintos gradientes de temperaturas a partir del factor ZT_{avg} que proporcione el fabricante.

4.2.3 Asociaciones de celdas peltier

Al igual que la asociación en serie del conjunto de termopares para generar más tensión, podemos conectar los módulos en serie o en paralelo si queremos suministrar una mayor energía a nuestra carga.

Asociación en serie: conectando módulos en serie aumentaremos el nivel de tensión a nuestra salida, aunque la corriente disminuye ligeramente debido a la suma de las resistencias internas.

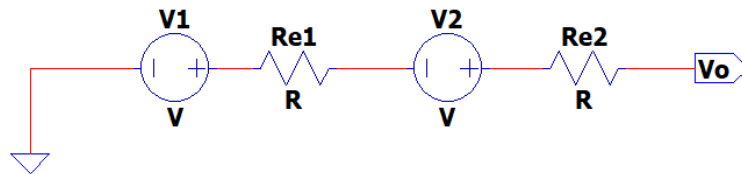


Figura 26. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación en serie de dos celdas peltier

Asociación en paralelo: con una conexión en paralelo conseguimos aumentar el valor de la corriente que circula por el circuito.

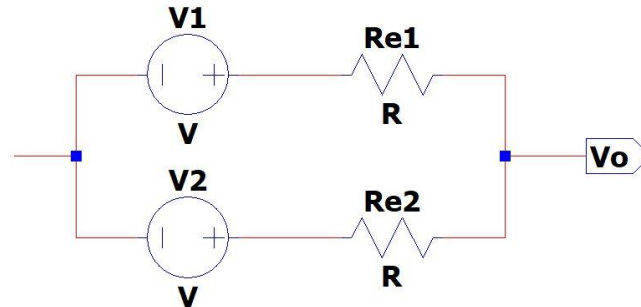


Figura 27. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación en paralelo de dos celdas peltier

Asociación mixta: es una combinación de conexiones en serie y en paralelo que permite sumar tensiones y corrientes.

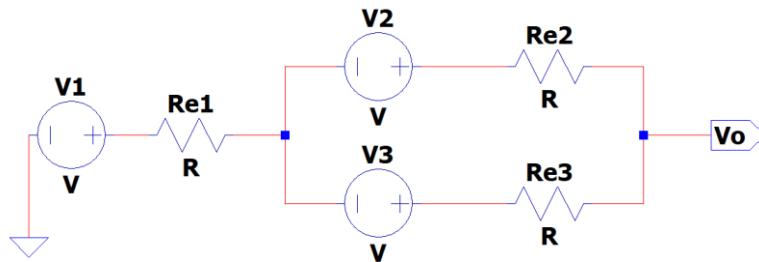


Figura 28. Circuito eléctrico equivalente ideal de la asociación mixta de tres celdas peltier

En la simulación del diseño se evaluará las asociaciones en serie y paralelo ya que los resultados pueden ser muy distintos a estas representaciones debido a los fenómenos termodinámicos explicados.

4.3 Módulos comerciales

Comercialmente se pueden encontrar dos tipos de celdas peltier, *Thermoelectric Cooler*, (TEC) y *Thermoelectric Generator* (TEG).

Ambos tienen un funcionamiento reversible, pueden crear gradientes de tensión aplicando una tensión o viceversa. Una de las grandes diferencias que podremos encontrar es las especificaciones técnicas que proporciona el fabricante, orientadas al uso para el que están diseñadas.

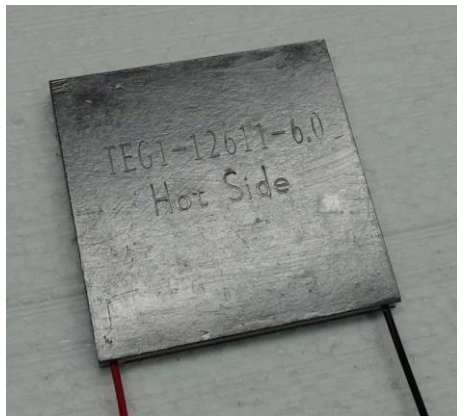


Figura 29. Módulo TEG 12611



Figura 30. Módulo TEC 12706

Tantos los TEC como los TEG están disponibles en diferentes tamaños, que varía en función del número de termopares que incluyen. Suele ser de 256, 127, 71, 49 o 31.

Si buscamos módulos TEC encontraremos una gran variedad de fabricantes como [Laird Technologies](#), [Advance Thermo Solutions](#), [CUI device](#) o [Wakefield-vette](#).

Fabricantes de TEG hay menos ([European Thermodynamics Ltd](#), [Marlow Industries](#), [KRYOTHERM](#) o [thermonamic](#)) pero disponen amplia variedad de módulos con distintas prestaciones.

Además, disponen de otros componentes acondicionadores para sistemas termoelectricos. La mayoría de sus productos se pueden comprar en tiendas con venta online de electrónica como RS-online, Digi-key, Amazon o Aliexpress.

Una opción barata puede ser el módulo SP1848-27145. Se trata de un módulo de la compañía Shenzhen Ruised Technology Co que está disponible tanto en Amazon como en Aliexpress (entre 2€ y 7€).

La única información disponible de este módulo es la que se proporciona en [los portales web de venta](#). Tiene una superficie de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ y un espesor de 0.34 cm. Funciona hasta los 150°C y para una diferencia de temperatura entre sus caras de 100°C el voltaje en circuito abierto son 4.8V. Por lo tanto, su coeficiente Seebeck a 100°C es de 48 mV/K . Teniendo en cuenta sus dimensiones y el coeficiente Seebeck total, debe de estar compuesto por 127 termopares.



Figura 31. Módulo peltier SP1848-27145 SA

Para poder hacer un análisis de su rendimiento necesitaríamos obtener medidas físicas ya que con la información disponible sería imposible realizar una simulación precisa.

Dado que no se van a realizar medidas del dispositivo, para este proyecto se elegirá los módulos de [European Thermodynamics Ltd.](#) Con la información del Datasheet podremos realizar la simulación del dispositivo seleccionado. Funcionan hasta 250°C y cuentan con unas prestaciones suficiente como para alimentar dispositivos de baja potencia. Su principal desventaja es el precio, las celdas más pequeñas valen como mínimo 15€ o 16€.

Módulo Peltier, 3.1W, 7V, Área 40 x 40mm, $\Delta T_{max} +150K$

Código RS: 693-7043 | N° ref. fabric.: GM200-127-14-16 | Fabricante: [European Thermodynamics](#)

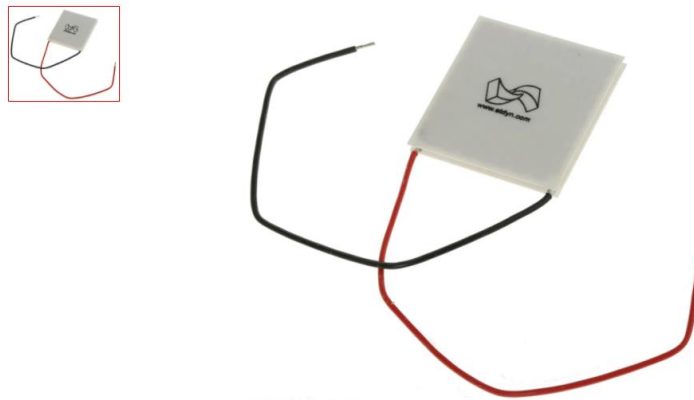


Figura 32. Módulo peltier GM200-127-14-16 (1)

4.4 Disipación del calor.

En cualquier medio, el calor fluye del lado caliente al lado más frío hasta que la temperatura en ambas caras se iguale debido a la conducción térmica y en el caso de las celdas peltier, también se ven afectadas por los efectos Peltier y Joule.

Dado que el espesor de la célula es muy pequeño, no pueden desprenderse del calor de la cara fría sin ayuda externa. La potencia que entrega a la carga decrementará, en mayor o menor medida, dependiendo de la conductividad térmica del material de la célula y especialmente rápido si aplicamos una fuente térmica de gran intensidad.

Para evitar que desaparezca el gradiente de temperatura es necesario utilizar disipadores de calor, radiadores o bloques de enfriamiento. Estos dispositivos son capaces de absorber ese flujo de calor y transmitirlo al aire u otro fluido.

Lo más adecuado es emplear los disipadores de calor de base plana utilizados para enfriar CPU o memorias RAM. Existen muchos tipos de disipadores de base plana con diferentes configuraciones de las aletas.

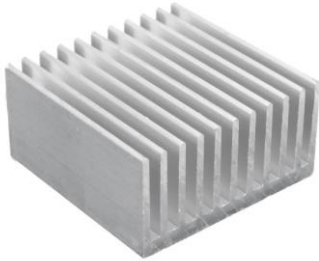


Figura 33. Disipador con base y aletas rectangular



Figura 34. Disipador en forma de dedo



Figura 35. Disipador con aletas extendida

EL conjunto de aletas expulsará el calor absorbido en la base mediante las leyes de la termodinámica. Su rendimiento dependerá de sus dimensiones y de la conductividad térmica con el que está hecho. Normalmente son aleaciones de aluminio o de cobre ya que pesan poco y tienen una alta conductividad térmica cuya variación es muy pequeña.

4.4.1 Transferencia de calor

Puede producirse en tres modos distintos: por conducción, por convección o por radiación. En el caso de las celdas peltier, la transmisión del calor será principalmente por conducción.

La transferencia de calor por conducción se basa en la transmisión de calor entre dos cuerpos en contacto y expuestos a diferentes temperaturas. El calor transferido al cuerpo con menor temperatura dependerá principalmente de la conducción térmica del material (sólido, líquido o gaseoso). En un sólido puede ser hasta 4 veces más grande que un líquido o un gas.

Ejemplos cotidianos en los que se produce una conducción de calor puede ser de una mano a un cubito de hielo, el líquido caliente de una taza a una cuchara o la pérdida de calor en invierno de una habitación hacia el exterior.

El flujo de calor por conducción, q''_x , es la velocidad de calor transferido por unidad de área y se fundamenta en la Ley de Fourier.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (50)$$

Por lo tanto, la transferencia de calor que atraviesa una superficie plana es $q_x = q''_x \cdot A$.

$$q_x = -Ak \frac{dT}{dx} \quad (51)$$

Es unidireccional y perpendicular a la superficie que atraviesa. Depende de la conductividad térmica y las dimensiones del cuerpo y de la temperatura a la que está expuesto. Su valor es negativo debido a que se transfiere en dirección a la temperatura más baja.

Si las condiciones en las que se encuentra son estables y no se produce una generación interna de calor, se puede expresar como

$$q_x = -Ak \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (52)$$

Siendo L la longitud del cuerpo que atraviesa, T_1 la temperatura en la superficie de contacto y T_2 la temperatura a la que está expuesta el otro extremo, comúnmente la temperatura ambiente del aire.

4.4.1.1 Superficie extendida

Se conoce como superficie extendida a las aletas unidas a la base. Al aumentar el área de disipación aumenta la transferencia de calor. Pueden ser rectangulares, triangulares, parabólicas o circulares.

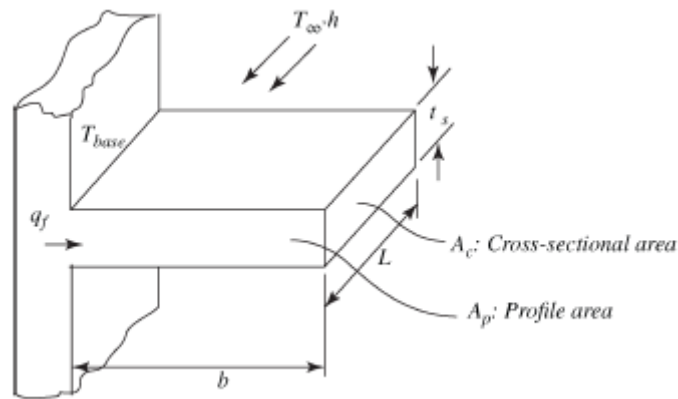


Figura 36. Sección de la superficie extendida de un disipador

Fuente: Thermoelectrics design and materials [12]

Según el principio de conservación de la energía, el flujo de calor entrante a la base de las aletas se dispersa por conducción a través de éstas y por convección al estar en contacto con el aire.

$$q_x = q_{x+dx} + q_{conv} \quad (53)$$

Hay que tener en cuenta su efectividad. No siempre ayudan a aumentar el flujo debido a que también aumenta la resistencia de conducción térmica. El espacio entre aletas es muy importante, si la distancia que las separa es muy pequeña puede ocurrir que el aire en contacto con las paredes laterales no sea suficiente para el intercambio de calor.

$$q_{x+dx} = n^{\circ}aletas \cdot q_{x,aleta} \quad (54)$$

El flujo de calor por conducción en las aletas dependerá de sus dimensiones al igual que en la base.

$$q_{conv} = -A \cdot h_c(T_2 - T_1) \quad (55)$$

Siendo h_c el coeficiente de convección, es decir, la velocidad de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido, el aire. La transferencia de calor por convección puede ser natural o forzada.

En el sistema termoeléctrico propuesto para este proyecto, la convección será natural, por lo que su implicación en comparación con la transferencia de calor por conducción será mucho menor.

4.4.2 Resistencia térmica

La resistencia térmica define la oposición que desempeña un material a la transferencia de calor. Es útil para representar el circuito equivalente de un sistema térmico.

La resistencia térmica total de un disipador teniendo en cuenta los fenómenos de conducción y convección es

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{L}{kA} + \frac{1}{hA} \quad (56)$$

Su valor será totalmente determinante en el rendimiento de celda peltier.

Para la simulación de la celda peltier junto a un disipador se establecerá una resistencia térmica equivalente que represente al disipador cuyo valor será proporcionado por el fabricante del dispositivo seleccionado

4.4.3 Interfaz térmica

Para la transferencia de calor de un cuerpo a otro es importante que la superficie de contacto sea lo menos rugosa posible. Si hay huecos de aire en la interfaz puede perjudicar al flujo.

Para evitar una pérdida de flujo calorífico se emplea los siguientes materiales:

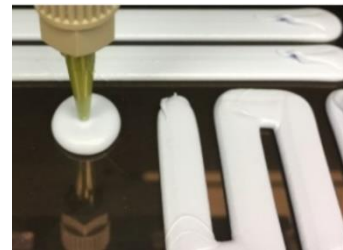


Figura 37. Pasta térmica

Figura 38. Lámina de grafito

Figura 39. Rellenador de hueco

Pasta térmica

La pasta térmica utilizada comúnmente en la electrónica comercial podría ser una solución ya que llena por completo cualquier hueco. Sin embargo, tiene la desventaja de que tiene una durabilidad de 3 a 5 años en el mejor de los casos y no soporta temperaturas por encima de los 100°C.

Láminas de grafito

En los sistemas termoeléctricos que van a estar expuestos a altas temperatura durante mucho tiempo se suele utilizar láminas de grafito. Son fácilmente moldeables, soportan temperaturas de hasta 3000°C y ofrecen una alta conducción térmica, hasta 1900 W/(m·K).

Rellenadores de huecos

Son habitualmente de silicona y tienen menor conductividad térmica que la pasta térmica y las láminas de grafito. Su principal ventaja es que rellenan de manera más efectiva huecos más grandes e irregulares.

4.4.4 Transferencia de calor en la superficie caliente

Otro factor importante es absorber la máxima cantidad de calor posible. Para ello, se suelen colocar láminas de aislamiento junto a láminas de grafito o pastas térmicas que mejorarán la conducción del calor y además protegerán la base cerámica.

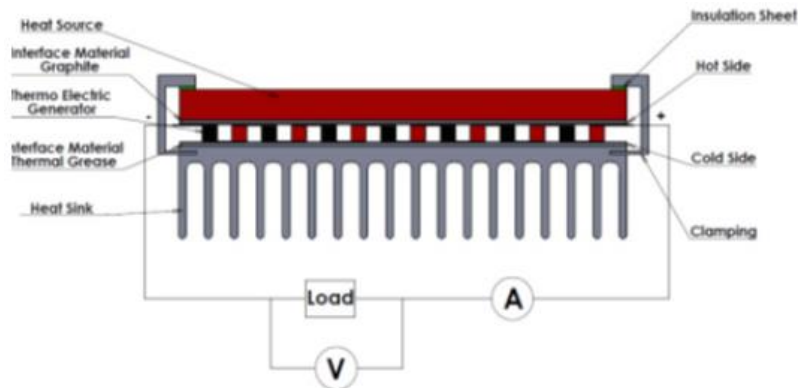


Figura 40. Conjunto de elementos acondicionadores de una celda peltier

4.4.5 Modelo equivalente térmico

Cuando hay más de un cuerpo, la transferencia de calor se considera en la misma dirección y, por lo tanto, sería una asociación en serie de resistencias térmicas.



Figura 41. Modelo equivalente térmico

En el modelo equivalente térmico la temperatura equivale a una fuente de tensión y el flujo de calor la corriente.

$$T_1 - T_2 = Q * R_{total} \quad (57)$$

Esta representación permite analizar y simular fenómenos térmicos igual que un circuito eléctrico.

En los modelos analíticos es imposible calcular la variación de temperatura que hay entre la fuente térmica y la base cerámica de la celda. Depende de múltiples factores como la distancia que los separa, la presencia de viento o la proximidad a otros elementos. Por este motivo, en la simulación se considerarán fuentes de térmicas ideales.

Capítulo 5

5 Regulador de tensión

En el análisis de la celda peltier hemos visto que podemos obtener un nivel de tensión continua si conseguimos que la diferencia de temperatura sea constante. Sin embargo, la diferencia de temperatura no va a ser siempre la misma y la tensión de salida deberá ajustarse a los dispositivos comerciales de bajo consumo, de 2 a 5V.

Para regular la tensión utilizaremos convertidores DC-DC, un convertidor elevador o en el caso de que nuestra celda/s genere por encima de esos niveles, un convertidor reductor elevador.

Están compuestos por semiconductores de potencia y elementos que almacenan energía (condensadores y bobinas). Sus principales aplicaciones son en motores de continua y en fuentes de alimentación reguladas.

Dentro de los convertidores DC-DC existen dos grupos:

- Convertidores sin aislamiento
- Convertidores con aislamiento

Incorporar un aislamiento entre la entrada y la salida del convertidor depende de los niveles de tensión a tratar. Para la tensión generada por una o varias celdas peltier no es necesario, ya que el objetivo es alimentar dispositivo de baja potencia. Además, añadir un transformador tiene la desventaja de que se pierde eficiencia y aumenta el volumen y el peso del convertidor.

5.1 Topologías básicas

Existen numerosas topologías de convertidores sin aislamiento con distintas características, pero la mayoría tienen como base estas configuraciones:

- Convertidor Reductor
- Convertidor Elevador

Este tipo de convertidores destacan por su simplicidad ya que utilizan muy pocos componentes. Esto hace que tengan un alto rendimiento, un reducido coste y que sean muy fiables.

Para regular la tensión, se modifica el ciclo de trabajo (D), es decir, la frecuencia de onda cuadrada que se aplica al transistor.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (58)$$

Además, dependiendo de la corriente que circule por la bobina, el convertidor se encontrará en modo de conducción continua (MCC) o modo de conducción discontinua (MCD).

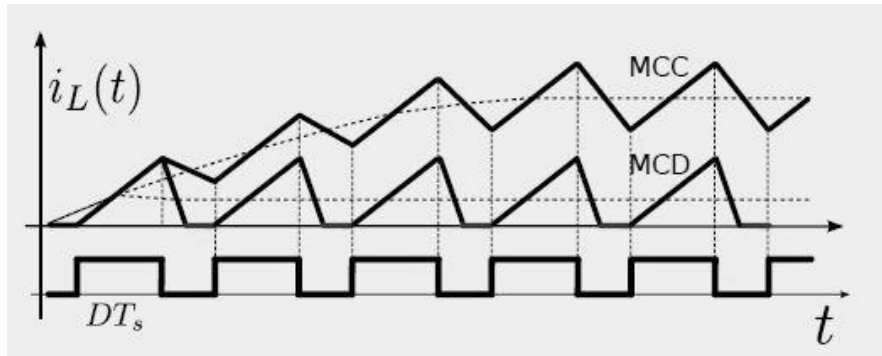


Figura 42. Variación de la corriente que atraviesa la bobina en MCC y MCD

Fuente: Diapositivas de la asignatura Electrónica de Potencia, Universidad de Alcalá [15]

En MCC la corriente que circula por la inductancia nunca se anula mientras que en MCD si lo hace antes de que termine el intervalo del interruptor en *off* (no puede tener valores negativos).

Todas las topologías que se van a describir a continuación están compuestas por una bobina, un condensador, un transistor MOSFET y un diodo utilizado para la libre circulación. La distribución de estos determinará el funcionamiento de cada uno.

El valor de inductancia debe garantizar el funcionamiento tanto en MCC como en MCD. Además, tendrá una gran repercusión en valor del rizado de la corriente de salida y en el tamaño y el precio de esta.

La capacidad del condensador también influirá en el rizado y en el filtrado de los armónicos presentes en la salida surgidos durante la conmutación.

Los parámetros para tener en cuenta de un transistor MOSFET, son la resistencia en serie cuando está activo y el tiempo que tarda en conmutar de un estado a otro.

Para electrónica de potencia es preferible utilizar diodos Schottky debido a su rapidez de conmutación y una tensión umbral de 0.2 a 0.4V. En algunos modelos se emplea otro transistor en sustitución del diodo para que funcionen de forma síncrona y así aumentar la eficiencia del convertidor.

5.1.1 Convertidor DC-DC reductor

El voltaje de salida del convertidor DC-DC reductor siempre será menor al voltaje de entrada. También es conocido como *step-down* o *Buck*.

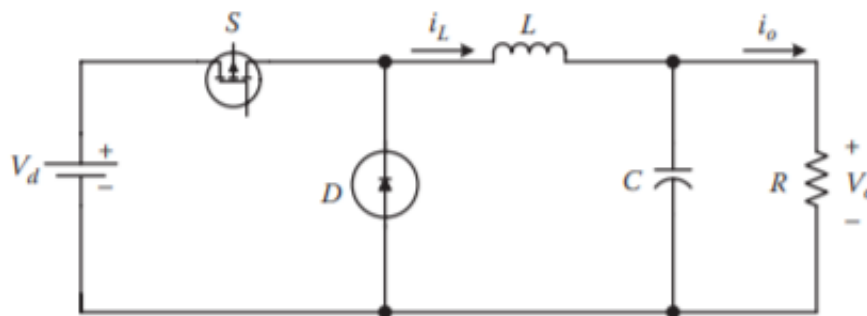


Figura 43. Esquema del convertidor dc-dc reductor

Fuente: Integrated Power Electronic Converters and Digital Control [18]

El comportamiento del convertidor se controla mediante el interruptor conectado en serie a la entrada. Cuando permanece encendido, el diodo está cortado y el inductor limita la corriente (i_L). Durante este tiempo, el inductor absorbe y almacena energía y la tensión de salida será la diferencia entre la tensión del diodo y la tensión de la bobina.

Al abrir el interruptor, i_L no puede cambiar instantáneamente. El inductor invierte su polaridad para forzar a que la corriente siga circulando después de que se abra. De este modo, se comporta como una fuente de corriente. El diodo comienza a funcionar facilitando la circulación de i_L . La corriente i_L disminuirá hasta que el interruptor vuelva a encenderse. El condensador almacena energía y posibilita que la tensión de salida no disminuya durante esta fase.

Si el sistema está equilibrado, y considerando los componentes ideales, la tensión de salida en MCC dependerá únicamente del ciclo de conmutación del transistor

$$V_o = DV_d \quad (59)$$

En modo MCD la relación entre el ciclo de trabajo y las tensiones de salida es

$$D = \frac{V_o}{V_d} \sqrt{\frac{2L}{R_L T_s} \frac{1}{1 - \frac{V_o}{V_d}}} \quad (60)$$

En este modo la ganancia del convertidor es muy dependiente del valor de la carga. Para que se mantenga constante se debe modificar el ciclo de trabajo en función de la variación de la carga. En esta topología, no se tiene gran interés este modo.

5.1.2 Convertidor DC-DC elevador

La tensión de salida que produce siempre va a ser igual o mayor que la tensión de entrada. También se le conoce como *Step-up* o *Boost*.

Sus elementos son los mismo que el convertidor reductor, pero con una configuración diferente.

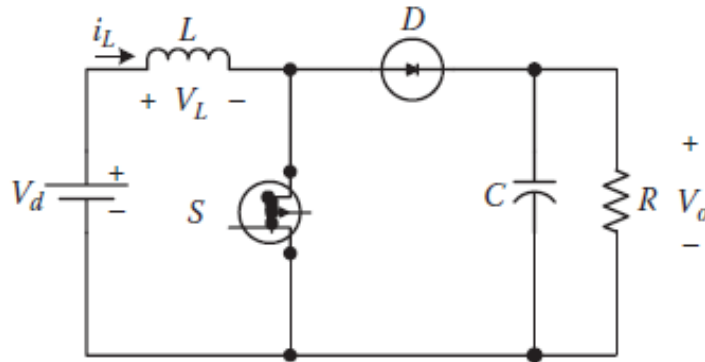


Figura 44. Esquema del convertidor dc-dc elevador

Fuente: Integrated Power Electronic Converters and Digital Control [18]

Cuando el interruptor está cerrado, el inductor empieza a cargarse con la energía procedente de la entrada puesto que el diodo está polarizado en inversa. La corriente que atraviesa el inductor aumentará mientras el interruptor está cerrado. Cuando se abra el interruptor, el inductor se resiste a que la corriente cambie su valor instantáneamente y libera rápidamente la energía absorbida durante el tiempo anterior para que se mantenga el flujo de la corriente. El condensador almacena esa energía que posibilita que V_o mantenga su nivel. El voltaje de la tensión de salida dependerá del tiempo que está encendido el interruptor.

Por lo tanto, la relación entre la entrada y la salida en MCC considerando todos los componentes ideales será

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad (61)$$

El convertidor, idealmente, se controla mediante el ciclo de trabajo y no depende del valor de la carga.

Si el circuito se encuentra en MCD:

$$D = \frac{V_o}{V_d} = \sqrt{\frac{2L}{R_L T_s} \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right)}$$

En este caso, la ganancia depende del valor de la inductancia y de la carga.

5.1.3 Convertidor DC-DC reductor-elevador

La topología que se va a describir en este apartado es la base de los convertidores reductor-elevador utilizados actualmente. También se le nombra convertidor step up- step down o Buck-Boost.

Se trata de una combinación de los dos convertidores vistos anteriormente. La tensión de salida será mayor o menor que la entrada.

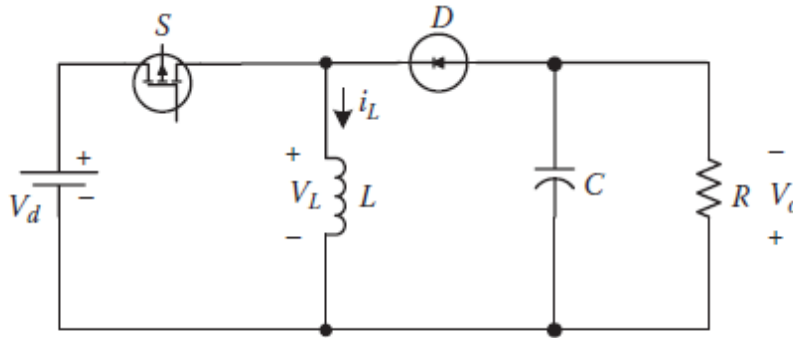


Figura 45. Esquema del convertidor dc-dc reductor-elevador

Fuente: Integrated Power Electronic Converters and Digital Control [18]

Inicialmente, con el interruptor apagado, no hay corriente circulando por el circuito. Con el interruptor encendido, el diodo permanecerá polarizado en inversa. La inductancia no permite un cambio rápido de corriente. Esto provoca que la corriente que la atraviesa inicialmente sea baja y la mayor parte de la energía se almacena en ella. El valor de i_L irá aumentando, a razón de V_L/L , durante el tiempo en *on*.

Al abrirse el interruptor de nuevo, el diodo conduce y la polaridad del inductor se invierte ya que trata de mantener el flujo de la corriente con el mismo sentido de circulación que tenía antes de que conmutara el transistor. Por lo tanto, trabaja como una fuente. La tensión de salida será igual a la corriente de salida por el valor de la resistencia de la carga. Cuando el interruptor vuelva a conmutar, mantendrá ese nivel de tensión puesto que la energía almacenada en el inductor durante el ciclo anterior se ha transferido al condensador. La polaridad de la carga quedará invertida respecto a la entrada.

Este tipo de convertidor es útil cuando es necesario elevar o reducir la entrada o cuando se requiere invertir la polaridad de la salida.

5.2 Elección del convertidor

Actualmente hay una gran disponibilidad de convertidores DC-DC con diferentes rangos de entrada y salida. Sin embargo, la mayoría funcionan alimentados con una fuente externa y con la señal PWM generada mediante un dispositivo externo.

Para un funcionamiento autónomo de la celda peltier necesitamos un convertidor que disponga de una unidad de control encargada de abrir y cerrar los interruptores y que se alimente de la propia fuente de energía conectada a la entrada.

Alguno de los fabricantes más grandes de este tipo de reguladores de tensión son [RECOM](#), [TRACO POWER](#), [Texas Instrument](#), [ROHM Semiconductor](#) y [Linear Technology \(Analog Device\)](#).



Figura 46. Regulador de tensión RECOM



Figura 47. Regulador de tensión TRACO POWER



Figura 48. Regulador de tensión LTC

Para este proyecto se va a escoger los dispositivos Linear Technology, ya que, en comparación con otros fabricantes, disponen de rango de entradas más amplios, tensiones mínimas más pequeñas y están orientados a sistemas recolectores de energía. Además, disponen de un software de simulación (LTspice) que permite analizar cualquiera de sus dispositivos con diferentes configuraciones.

Part Number	Number of Outputs	Energy Source	Topology	Vin min V	Vin max V
Filter Parts	1 - 3	5 Values Selected	3 Values Selected	20m - 12	500m - 12
Compare	HIDE	HIDE	HIDE	HIDE	HIDE
9 parts					
<input type="checkbox"/> LTC3106	1	Solar, Thermoelectric	Buck-Boost	850m	5.1
<input type="checkbox"/> LTC3105	1	Solar	Boost	200m	5
<input type="checkbox"/> LTC3535	2	-	Boost	500m	5
<input type="checkbox"/> LTC3526L	1	-	Boost	500m	5
<input type="checkbox"/> LTC3107	3	Thermoelectric	Boost, LDO	20m	500m
<input type="checkbox"/> LTC3109	3	Thermoelectric	Boost	20m	500m
<input type="checkbox"/> LTC3108-1	3	Thermoelectric	Boost, LDO	20m	500m
<input type="checkbox"/> LTC3108	3	Thermoelectric	Boost, LDO	20m	500m

Figura 49. Captura de algunos de los dispositivos LTC aplicables a un sistema harvesting termoeléctrico

La Figura 49 es una captura de los posibles convertidores de [Linear Technology](https://www.linear.com) que podemos aplicar a las celdas peltier. Se diferencian por su tensión de arranque, el número de salidas y el control y calidad de la energía entre otras características.

Observando las prestaciones de cada uno de ellos se han seleccionado para este proyecto el LTC3106 y el LTC3108. En los siguientes apartados, se va a analizar los elementos que lo componen y su funcionamiento.

5.2.1 LTC3106

El LTC3106 es un convertidor reductor elevador síncrono con control automático. Un convertidor síncrono consiste en que la función del diodo vista en el análisis de las topologías básicas de un convertidor la lleva a cabo un interruptor que trabaja de manera síncrona con el interruptor principal con el fin de mejorar la eficiencia del convertidor.

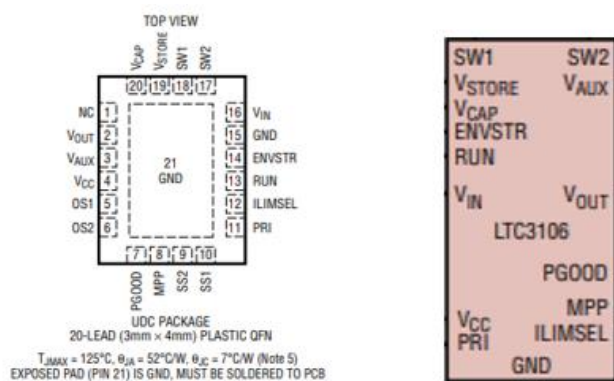


Figura 50. Diagrama de pines del LTC3106

Sus principales características son:

- Dispone de doble entrada (fuente principal de energía y fuente de respaldo).
- Su tensión de arranque es de 850mV y en caso de tener conectada la fuente de respaldo, 300mV.
- La tensión de salida está regulada mediante selección digital.
- Control de punto de máxima potencia.
- Corriente en modo reposo ultra baja, 1.6μA.
- Capacidad de recargar la fuente de respaldo.
- Auto desconexión de la batería para preservar su vida.
- Modo Burst.
- Indicador de buena potencia.
- Limitación de la corriente de pico que atraviesa la bobina del convertidor.

En la siguiente figura proporcionada por el fabricante del dispositivo se representa la eficiencia y la pérdida de potencia frente al tipo de entrada.

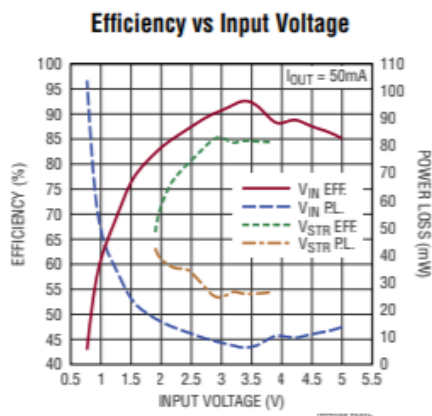


Figura 51. Curva de la eficiencia del LTC3106 frente a la tensión de entrada

En el apartado de los anexos se ha añadido el Datasheet del componente para consultar sus propiedades eléctricas, rangos de operación y graficas de rendimiento.

DIAGRAMA DE BLOQUES Y FUNCIONAMIENTO

Este convertidor está integrado por una unidad de control que determina el estado de los interruptores en función de las señales de salida de los comparadores de niveles de tensión (Figura 52).

La fuente de entrada principal se conecta al pin V_{IN} . Debe de estar desacoplado con un condensador cuya capacidad depende de la impedancia de la fuente. (Mínimo $10\mu F$). Si V_{IN} no está disponible, el regulador cambia automáticamente la entrada del convertidor a la batería de respaldo conectada al pin V_{STORE} .

El pin V_{CAP} es un pin de aislamiento de V_{store} que podemos utilizarlo para manejar la carga máxima de la batería de respaldo o conectarlo directamente a **GND** si no queremos aislar la batería.

Esta batería se recargará siempre que haya exceso de energía. La recarga se habilita con el pin **PRI**. Cuando PRI está conectado a GND se habilita la recarga. Para deshabilitarla, se conecta al pin V_{CC} . La corriente máxima de recarga es de 30mA.

V_{CC} es un carril de suministro que se utiliza para alimentar circuitos internos y que debe de estar desacoplado. Su valor se determina internamente (igual al más alto entre V_{IN} , V_{STORE} , V_{OUT} o V_{AUX}).

Cuando la batería de respaldo este cargada o deshabilitada su recarga, se almacena energía en el condensador conectado a la entrada de V_{IN} .

El pin **ENVSTR** se conecta directamente a la fuente de respaldo y en función de su valor ($V_{STORE,MIN} > 0.3V$) habilita V_{STORE} , como entrada del convertidor. En caso de no estar disponible, apaga V_{CAP} .

V_{AUX} , al igual que V_{CC} , se utiliza para alimentar circuitos internos. Para ello, conectamos un condensador cerámico de $2.2\mu F$ entre este pin y GND. Se carga al inicio, con los rectificadores síncronos desactivados, y una vez que alcance 5.2V comienza a cargarse V_{OUT} . Si su valor cae a 5.1V, la energía se vuelve a desviar a V_{AUX} . para su recarga.

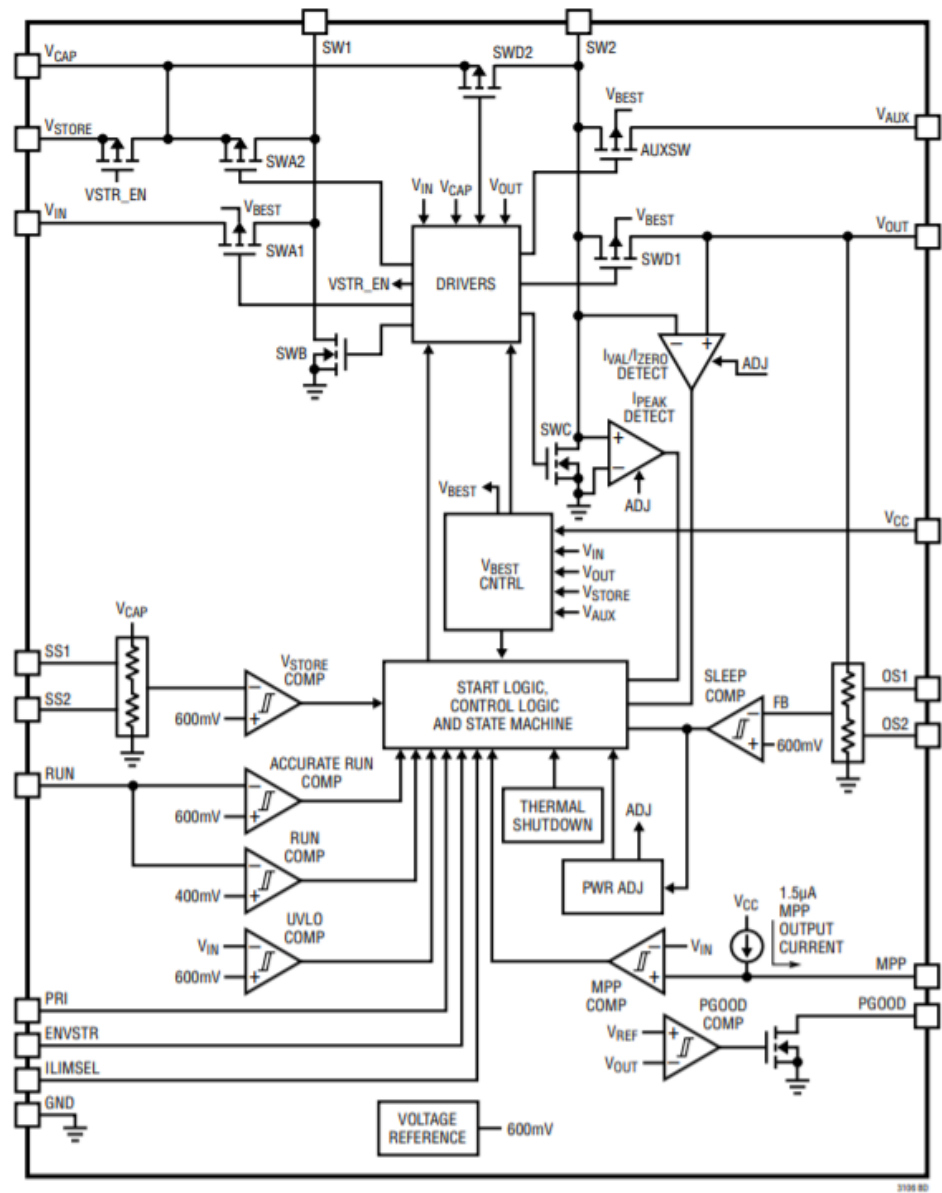


Figura 52. Diagrama de bloques del LTC3106

La salida del convertidor es el pin **V_{OUT}**. Comienza su carga de forma asíncrona hasta que alcance 1.2V. A partir de este nivel de tensión, el convertidor funciona en modo síncrono para ser más eficiente. En la salida del pin **V_{OUT}**, se conecta un condensador para reducir el rizado. Cuanto mayor sea la capacidad de este condensador, menos rizado habrá en la salida, aunque esto conlleva que se reduzca la eficiencia ya que aumenta la corriente de pico. El valor de **V_{OUT}** se programa con los pines **OS1** Y **OS2**.

Tabla 3. Tabla de verdad para la selección de *V_{out}* del LTC3106

OS1	OS2	OUTPUT VOLTAGE
0	0	1.8V
0	V _{CC}	2.2V
V _{CC}	0	3.3V
V _{CC}	V _{CC}	5V

La inductancia del convertidor se conecta entre los pines **SW1 Y SW2**. Es necesario conectar un diodo Schottky entre SW2 y V_{AUX} para evitar corrientes parásitas en V_{OUT} cuando se esté recargando la batería de respaldo.

El LTC3106 cuenta con siete comparadores que determinan el funcionamiento de interruptores. El primero de los cuatro comparadores del lado izquierdo del diagrama, **V_{STORE} COMP**, determina el nivel de capacidad máxima de V_{STORE} y su umbral de batería baja. Se programan con **SS1 y SS2**.

Tabla 4. Tabla de verdad para la selección de los límites de V_{store} del LTC3106

PRI	SS1	SS2	$V_{STORE}/V_{CAP OV}$	$V_{STORE}/V_{CAP UV}$	BATTERY TYPE
0	0	0	4V	2.78V	Li Carbon
0	0	V_{CC}	2.9V	1.9V	2x Rechargeable NiMH
0	V_{CC}	0	3V	2.15V	Rechargeable Li Coin Cell
0	V_{CC}	V_{CC}	4V	3V	Li Polymer/Graphite
V_{CC}	0	0	4.2V	2.1V	Primary, Non-Rechargeable

ACCURATE RUN COMP, es un comparador preciso que impide la conmutación de la entrada por debajo de 500mV.

RUN COMP, habilita que algunos circuitos internos comiencen a trabajar por debajo del umbral de V_{IN} , aumentando la efectividad del convertidor. El voltaje típico necesario es 400mV. Este voltaje de referencia se compara con la entrada del pin **RUN**. El pin **RUN** se puede conectar a V_{IN} o a V_{STORE} .

El comparador **UVLO COMP**, tiene como entrada la señal V_{IN} y un voltaje de referencia interno de 600mV. Cuando $V_{IN} \geq 0.6V$, se prioriza sobre V_{STORE} como entrada del convertidor.

Los umbrales se pueden modificar externamente para que sea más preciso, conectando un divisor resistivo entre V_{IN} y RUN.

$$V_{in (ON)} = 0.6V(1 + R1 + R2.) \quad (62)$$

Al incluir un ciclo de histéresis de 100mV, el umbral para que V_{IN} se desactive es de 0.5V:

$$V_{in (Off)} = 0.5V(1 + R1 + R2) \quad (63)$$

En el lado derecho del diagrama, el comparador **SLEEP COMP**, monitorea la salida comparándola con el nivel seleccionado. Si es mayor, el convertido entra en modo reposo.

El comparador **MPP COMP**, es otro regulador de la entrada V_{IN} alternativo a RUN. Tiene como entradas el pin **MPP** y V_{IN} . Cuando $V_{IN} \leq V_{MPP}$, la entrada cambia a V_{STORE} , si está habilitada. Si no lo está, el convertidor está en modo suspendido hasta que $V_{IN} \geq V_{MPP}$. El nivel de V_{MPP} se ajusta con una resistencia externa, mientras que circula una corriente de 1.2μA. Para desactivar MPP, se conecta a V_{CC} .

Por último, el comparador **PGOOD COMP**, indica la calidad de la potencia de salida. Compara V_{out} con un voltaje de referencia. Se activa el pin de salida **P_{GOOD}** cuando V_{OUT} baja un 10% de su nivel seleccionado. Dispone de un pull-down interno que se apagará cuando V_{OUT} se eleva dentro del 8% y **P_{GOOD}** subirá si se ha conectado una resistencia externa del pull-up. Para evitar disparos de señal debido al transitorio corto de V_{OUT} se le aplica un filtro.

El pin **ILIMSEL** habilita que se pueda maximizar la eficiencia con cargas ligeras y permite modificar la corriente de pico que atraviesa la bobina, **I_{PEAK}**, para ajustar la potencia. La corriente de valle, **I_{VALLEY}**, se ajusta automáticamente. Si se desea maximizar la potencia, se deshabilita este pin conectándolo a V_{CC} .

Tabla 5. Tabla de verdad para la selección del límite de la corriente del LTC3106

ILIMSEL	V_{IN} PEAK I_{LIMIT} (mA)	V_{STORE} PEAK I_{LIMIT} (mA)
0	100	100
V_{CC}	650	170

La corriente máxima de la inductancia es de 650mA para V_{IN} y de 170mA para V_{STORE} . La mínima de 100mA en ambas fuentes es de 100mA.

MODOS DE FUNCIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR

Cuando $V_{AUX} = 5.2$ V y $V_{out} > 1.2$ V el convertidor comenzará su funcionamiento normal, priorizando siempre como entrada V_{IN} a V_{STORE} y recargando V_{AUX} periódicamente.

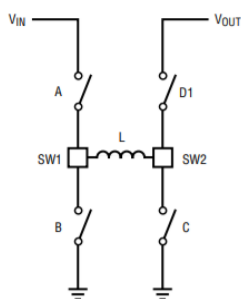


Figura 53. Esquema del convertidor dc-dc del LTC3106

Si V_{OUT} sobrepasa el nivel seleccionado, no se produce ninguna conmutación, (modo reposo). Cuando decae, el convertidor se despierta del modo reposo y comienza de nuevo a conmutar y a cargarse el condensador conectado en la salida. En función del valor de este condensador, la carga de la corriente, V_{IN} y el voltaje del comparador, se determina el número de pulsos de corriente necesarios para que se cargue.

Los interruptores A, B y C determinan el modo de funcionamiento del convertidor. El interruptor D1 hace la función de diodo para que el convertidor funcione de síncronamente y así mejorar su eficiencia.

MODO BOOST

El convertidor funciona en modo Boost cuando $V_{IN} < V_{OUT} - 300$ mV.

La secuencia de conmutación es la siguiente:

1. Los interruptores A y C se cierran y V_{IN} se aplica a la bobina exterior hasta que se alcanza **I_{PEAK}**.
2. Una vez alcanzado **I_{PEAK}**, se abre C y D1 se cierra. La corriente se entrega al condensador de salida. La corriente descende su valor hasta que se detecta su mínimo, **I_{VALLEY}**. Al condensador se le aplica $V_{IN} - V_{OUT}$.
3. Cuando se detecta **I_{VALLEY}**, comienza de nuevo la secuencia.

Esta secuencia se repite hasta que V_{OUT} alcance el nivel de tensión programado y el convertidor vuelve al modo reposo.

MODOS BUCK

El convertidor funciona en modo Buck cuando $V_{IN} > V_{OUT} + 700mV$.

La secuencia de conmutación es la siguiente:

1. Los interruptores A y D1 están cerrados y se aplica $V_{IN} - V_{OUT}$ a condensador. Se entrega energía a la salida hasta que se detecta I_{PEAK} .
2. Cuando se alcanza I_{PEAK} , A se cierra y se abre el interruptor B. Al inductor se le aplica V_{OUT} , decayendo la corriente.
3. Cuando se detecta I_{VALLEY} , se repite la secuencia.

Esta secuencia se repite hasta que V_{OUT} alcance el nivel de tensión programado y el convertidor vuelve al modo reposo.

MODOS BUCK-BOOST

Este modo ocurre cuando $V_{OUT} + 700mV < V_{IN} < V_{OUT} - 300mV$.

Cuando V_{OUT} cae por debajo del nivel seleccionado, se cierran A y C iniciando la misma secuencia que para el modo Boost. A y D se cierran cuando se detecta I_{PEAK} . La pendiente de la corriente depende de la relación entre V_{IN} , V_{OUT} y $R_{DS(on)}$ de los interruptores. En este modo se utiliza un temporizador para terminar el pulso AD. Cuando termina, el interruptor A se apaga y se enciende B, disminuye la corriente, hasta que se detecta I_{VALLEY} , repitiéndose la secuencia hasta que la salida esté regulada. Esta configuración asegura que no haya conducción cruzada.

5.2.2 LTC3108

Se trata de un elevador de tensión que no funciona como un convertidor DC-DC convencional. Es ideal para fuentes de energía débiles ya que es capaz de manejar voltajes muy bajos.

Sus características principales son:

- Opera con tensiones de entrada desde 20mV hasta 500mV.
- Dispone de varias tensiones de salida.
- La tensión de salida principal es programable a 2.35V, 3.3V, 4.1V o 5V.
- Dispone de regulador de baja caída (LDO) para 2.2V a 3mA.
- Permite almacenamiento energético.
- Indicador de buena energía.
- Protección ante corto circuitos. Todas las salidas tienen limitaciones de corriente.

El LTC3108 está diseñado para aplicar a su entrada un transformador elevador con el fin de alimentar sensores inalámbricos de baja potencia.

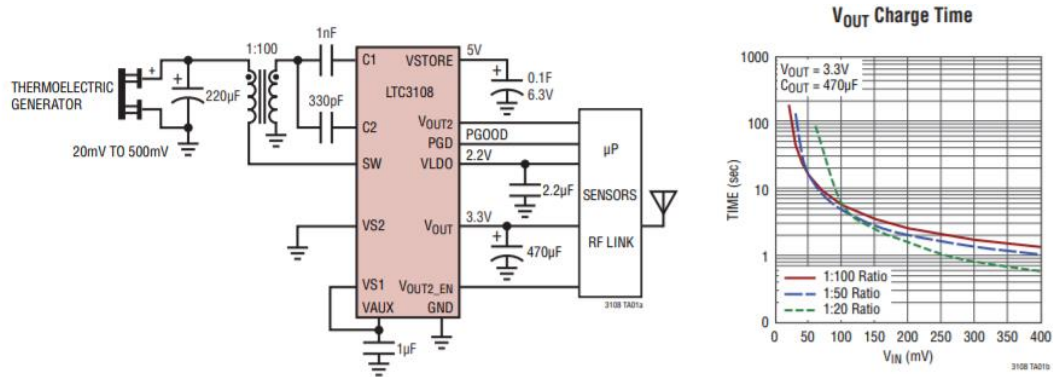


Figura 54. Configuración del LTC 3108 y tiempo de carga de Vout

DIAGRAMA DE BLOQUES Y FUNCIONAMIENTO

A diferencia del anterior convertidor, está integrado por menos bloques y dispone de menos funciones debido a que se manejan voltajes más pequeños.

Está compuesto por un oscilador, un rectificador y una unidad de control de carga que opera en función de las señales de comparadores y almacenadores de energía.

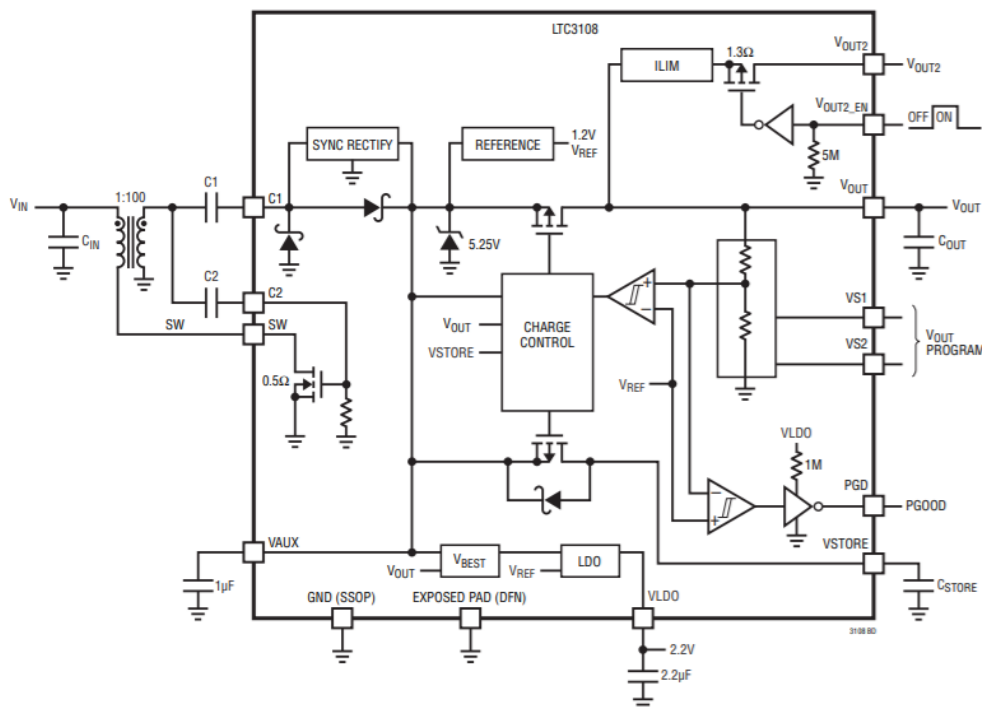


Figura 55. Diagrama de bloques del LTC3108

Para poder aumentar voltajes de entrada tan bajos utiliza un oscilador compuesto por un interruptor MOSFET, un pequeño condensador de acoplamiento y un transformador elevador. El interruptor es interno y se conecta a través del pin **SW** con el devanado primario del transformador. El condensador se coloca entre el devanado secundario del transformador y el pin **C2**, conectado internamente con el interruptor.

Al pin **C1** conectamos otro condensador para que el circuito rectificador interno alimente el condensador externo conectado en V_{AUX} . Cuando $V_{AUX} > 2V$ se activa el voltaje de referencia

interno y comienzan a funcionar los rectificadores síncronos en paralelo que mejoran la eficiencia. La salida V_{out} comienza su carga para $V_{AUX} > 2.5V$. El valor máximo de V_{AUX} es 5.2V.

La salida regulada de 2.2V, V_{LDO} , sirve para alimentar procesadores y circuitos integrados de baja potencia. Se carga a partir del voltaje más alto, V_{AUX} o V_{OUT} . Para mejorar su eficiencia se conecta un condensador a su salida. Si no se va a utilizar, se conecta directamente con V_{AUX} .

El voltaje de salida principal, V_{OUT} , se regula con los pines de selección **VS1** y **VS2**. Se carga del suministro V_{AUX} . Cuando alcanza su valor seleccionado se finaliza la carga mediante un interruptor. La corriente de carga depende de la tensión de entrada y la relación del transformador. Está limitada a 4.5mA.

Tabla 6. Tabla de verdad para la selección de V_{out} del LTC3108

Table 1. Regulated Voltage Using Pins VS1 and VS2

VS2	VS1	V _{OUT}
GND	GND	2.35V
GND	VAUX	3.3V
VAUX	GND	4.1V
VAUX	VAUX	5V

La calidad de V_{out} es monitorizada mediante un comparador cuyas entradas son V_{out} y una tensión de referencia. Cuando V_{out} está dentro del rango de 7.5% del nivel seleccionado se activa la señal del pin **P_{GOOD}**. Si cae un 9%, se desactiva la seña de indicación de buena potencia. **P_{GOOD}** es una salida de drenaje abierto con una resistencia interna de pull-up débil (1M Ω).

La tensión de salida secundaria, V_{OUT2} , se habilita mediante del pin **V_{OUT2_EN}**. Se conecta a V_{out} a través del interruptor MOSFET con resistencia 1.3 Ω . La corriente de salida de V_{OUT2} está limitada a 0.3A.

La energía sobrante se puede almacenar en una batería recargable a través del pin **V_{STORE}**, con el fin de sustituir a la fuente de entrada cuando ésta no esté disponible. Si V_{AUX} disminuye, se alimenta directamente de **V_{STORE}**.

OTRAS CONFIGURACIONES

En caso de que la tensión de entrada sea superior a 5V se puede prescindir del transformador de entrada.

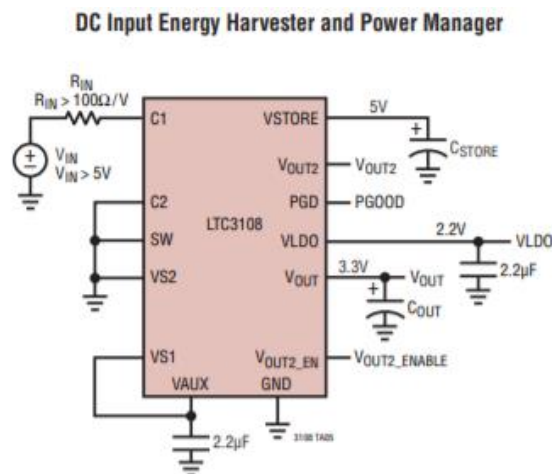


Figura 56. Configuración del LTC3108 para tensiones de entrada mayores a 5V

Otras configuraciones interesantes recomendadas por el fabricante son utilizando varias celdas peltier para cargar V_{AUX} (Figura 57) o para cargar un supercondensador que podría ser la fuente de respaldo del LTC3106 (Figura 58).

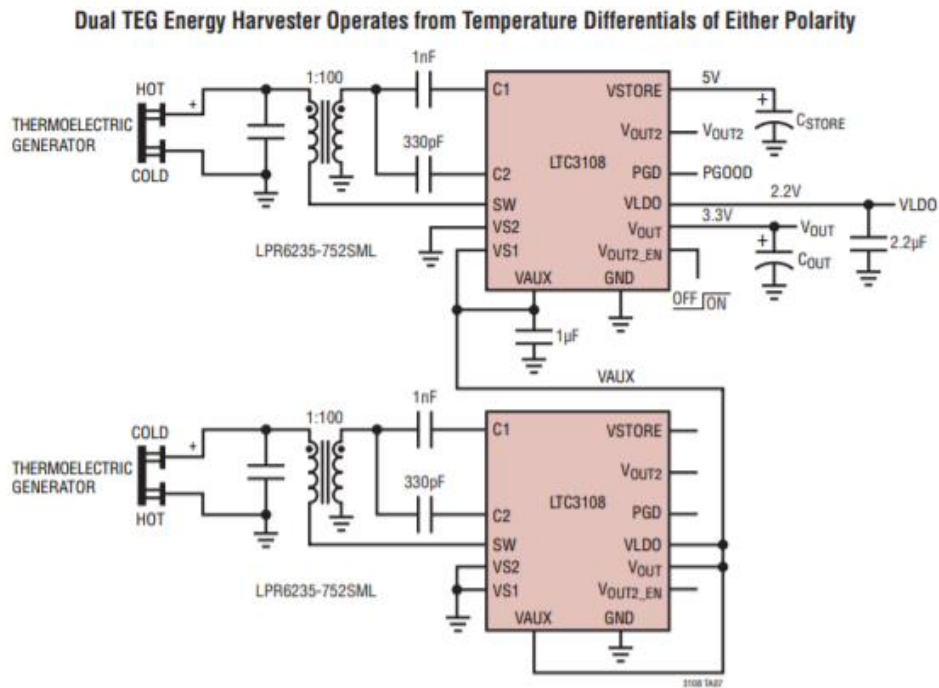


Figura 57. Configuración para el uso de dos dispositivos LTC3108

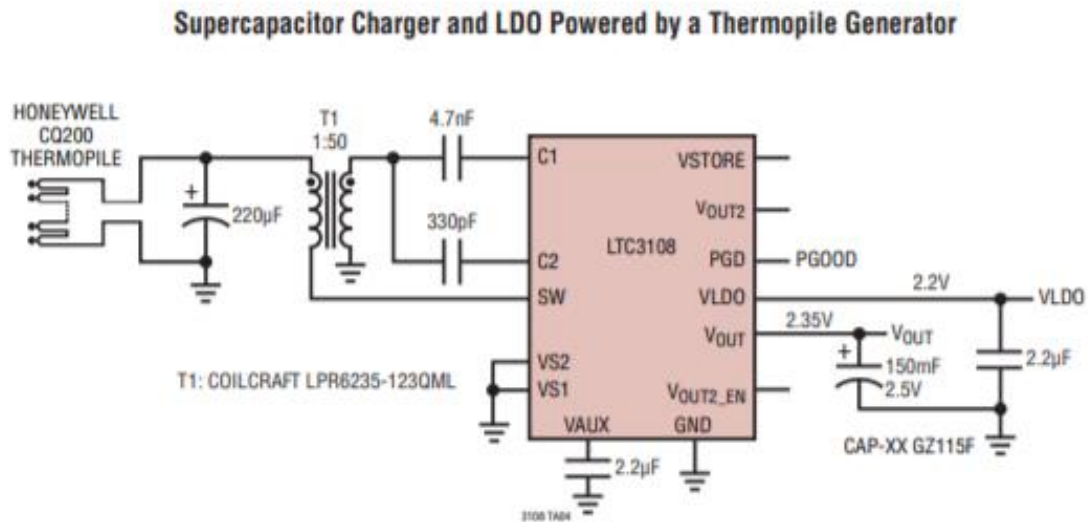


Figura 58. Configuración del LTC3108 para cargar un supercondensador

5.3 Almacenamiento energético

En un sistema harvesting autónomo es necesario disponer de una fuente de energía de respaldo para cuando la fuente principal no esté disponible. Los supercondensadores son el almacenamiento energético ideal debido a que ofrecen una vida útil mucho más prolongada en comparación con otros almacenadores. Este factor evitaría su sustitución periódica, que, tal y como se ha apuntado anteriormente, es muy importante en los sistemas harvesting.

Los supercondensadores se caracterizan por:

- Altos valores de capacidad. Acumulan mucha más energía en comparación con los condensadores electrolíticos.
- Número de cargas y descargas “ilimitadas”. Tanto la carga como la descarga del supercondensador se realiza muy rápidamente.
- Soportan grandes temperaturas.
- No es necesario circuitos de desconexión para protegerlo cuando se complete la carga.

A diferencia de los condensadores electrolíticos y otros almacenadores es que su voltaje máximo está más limitado. Por esta razón se suelen agrupar en baterías para aumentar el voltaje. Al conectar supercondensadores en serie se reduce la capacidad, por lo que es necesario conexiones mixtas, en paralelo y en serie, si se quiere aumentar la tensión sin perjudicar al número de faradios.

Otra desventaja es que, durante su ciclo de descarga, disminuye la tensión, por lo que es necesario un regulador de tensión para mantener un valor constante.

En el ciclo de carga, la tensión aumenta linealmente. La corriente decae cuando está cargado completamente, por ello, no es necesario emplear un circuito de detección de fin de carga. La tensión que se le aplique siempre tiene que ser igual o menor que su tensión máxima de operación.

EL circuito equivalente básico de un supercondensador lo conforma un condensador, que representa la capacidad energética del mismo (C) junto a dos resistencias, una conectada en serie (ESR) y la otra en paralelo (EPR). ESR representa la resistencia a la corriente por parte del supercondensador. EPR, decide la corriente de fuga cuando está en modo reposo.

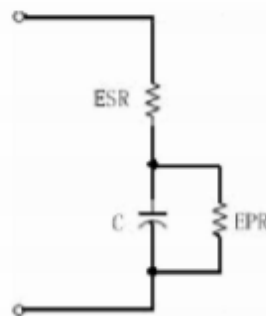


Figura 59. Circuito equivalente básico de un supercondensador

Fuente: "A Study of Supercapacitor Parameters and Characteristics"[19]

La energía almacenada en un supercondensador es

$$E(t) = \frac{1}{2} C V_c^2 e^{\frac{-2t}{R_{EPR} C}} \quad (64)$$

Donde $e^{\frac{-2t}{R_{EPR} C}}$ representa el proceso de auto descarga.

El tiempo de carga de un supercondensador además de la capacidad y el voltaje, depende de la corriente aplicada.

5.4 Diseño propuesto

Para regular la tensión de salida que genere las celdas peltier se ha propuesto un diseño conformado por los dos reguladores descritos. El LTC3106 regula la tensión de la aplicación principal y el LTC3108 se activa para aprovechar tensiones más pequeñas y no aplicables al LTC3106. La tensión de salida será de 3.3V. Un nivel de tensión típico de dispositivos de bajo consumo.

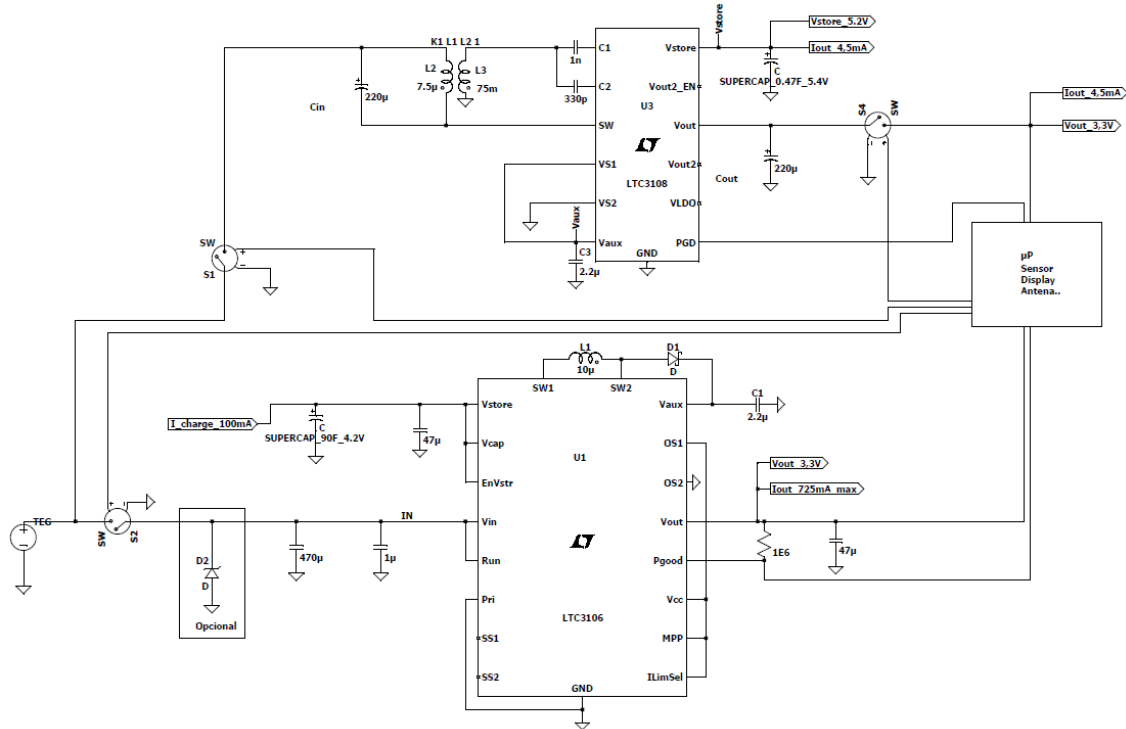


Figura 60. Esquema del diseño propuesto realizado en LTspice

Al LTC3106 debe conectarse una o varias celdas peltier que se ajuste al rango de entrada (800mV-5V).

Está configurado para que comience a funcionar cuando la tensión de entrada sea mayor a 400mV. A partir de este nivel de tensión comienza a funcionar alguno de los circuitos internos. Para $V_{IN} \geq 800mV$ comenzará a funcionar el convertidor. En caso de que sea posible que se supere la tensión de entrada máxima (5V), es recomendable conectar en paralelo a la celda un diodo Zener de bajo consumo. La tensión de salida del LTC3106 se programa a 3.3V con los pines OS1 y OS2.

Como fuente de respaldo principal, aplicamos un supercondensador de 90F y 4.2V. Este supercondensador se recargará cuando haya exceso de energía. La corriente máxima de recarga es de 30mA.

Si $V_{IN} < 400mV$, conectamos la celda peltier al LTC3108. Para la activación de los interruptores que cambian la conexión se puede implementar mediante comparadores y puertas lógicas de bajo consumo o que la lleve a cabo la propia unidad de control del microprocesador de la aplicación conectada.

En el pin V_{STORE} del LTC3108 se ha conectado un supercondensador adicional para que almacene energía hasta que se agote la fuente de respaldo del LTC3106. La corriente de carga máxima en este pin es de 4.5mA por esta razón, la capacidad de este supercondensador debe ser de mucho menos tamaño para evitar un tiempo de carga de larga duración.

La tensión de salida regulada del LTC3108 puede aprovecharse para seguir alimentando dispositivos que consuman menos o para recargar la fuente de respaldo principal hasta que esté disponible el LTC3106. Hay que tener en cuenta que con la corriente de salida del LTC3108 (4.5mA) la recarga podría durar horas.

Cuando V_{IN} vuelva a establecerse en el rango 800mV-5V la unidad de control se encargaría, de nuevo, del cambio de conexión.

El resto de los componentes aplicados (inductancias, resistencias, condensadores cerámicos...) son los recomendados por el fabricante.

La cantidad de energía que puede almacenar los supercondensadores seleccionados y la salida del LTC3108 están orientados únicamente para microelectrónica. Si quisiéramos cargar baterías de dispositivos móviles que usamos a diario sería únicamente posible con la señal de salida del LTC3106 y estando disponible la fuente de energía principal, las celdas peltier, ya que para este tipo de dispositivos se necesitaría almacenadores más grandes.

Capítulo 6

6 Simulación del diseño

En este capítulo se va a simular el funcionamiento del diseño propuesto.

Primero, se va a simular la celda peltier en función de distintos parámetros a partir de los datos proporcionados por el fabricante en el entorno MATLAB/Simulink.

A continuación, se simulará el diseño propuesto para regular la tensión mediante la herramienta proporcionada por el fabricante de los dispositivos seleccionados, LTspice.

Por último, se utilizará nuevamente MATLAB/Simulink para obtener los tiempos de carga del almacenamiento energético.

6.1 Simulación de la celda Peltier

En el entorno MATLAB existen [aplicaciones sencillas](#) que permiten simular de forma precisa generadores termoeléctricos con distintos materiales y dimensiones y para grandes rangos de temperatura. Sin embargo, no proporcionan mucha más información que la que podemos obtener por parte de los fabricantes la cual es escasa siendo imposible adivinar la respuesta de una o varias celdas peltier en función del disipador utilizado.

Por esta razón se ha diseñado una simulación en MATLAB/Simulink para analizar rendimiento de las celdas peltier ante diferentes disipadores y cargas conectadas a partir de las características básicas que podemos encontrar en el Datasheet de los componentes.

Procedimiento de la simulación

Inicialmente, se calcularán las propiedades y las dimensiones de la celda peltier seleccionada a partir de los datos o gráficas que podemos encontrar en el Datasheet que proporciona el fabricante. Si no se dispone de suficiente información sería necesario realizar medidas de la celda para obtener la resistencia interna de la celda y su conductancia termal ya que estos parámetros son imprescindibles para realizar una simulación precisa.

Una vez ajustado los parámetros del esquema de simulación se realizarán los siguientes análisis:

1. Simulación de la celda peltier en condiciones ideales para obtener sus prestaciones máximas en función de la carga.
2. Simulación de la celda peltier en función de la resistencia térmica equivalente del disipador de calor conectado a la superficie fría.
3. Simulación de la celda peltier utilizando un disipador comercial en función de la carga.
4. Análisis de asociaciones de celda en serie, en paralelo o mixta utilizando cada uno o varios disipadores.

Todas las simulaciones serán realizadas con valores de temperatura tolerables por la celda seleccionada.

6.1.1 Esquema

Para obtener una respuesta real de la celda peltier se ha diseñado el esquema de la Figura 61 en Simulink utilizando bloques de la librería Simscape. Simulink es un entorno de MATLAB de diagrama de bloques muy utilizada en ingeniería electrónica que posibilita modelar y simular sistemas dinámicos. Además, permite incorporar algoritmos de MATLAB en modelos de simulación y exportar sus resultados a MATLAB para su posterior análisis.

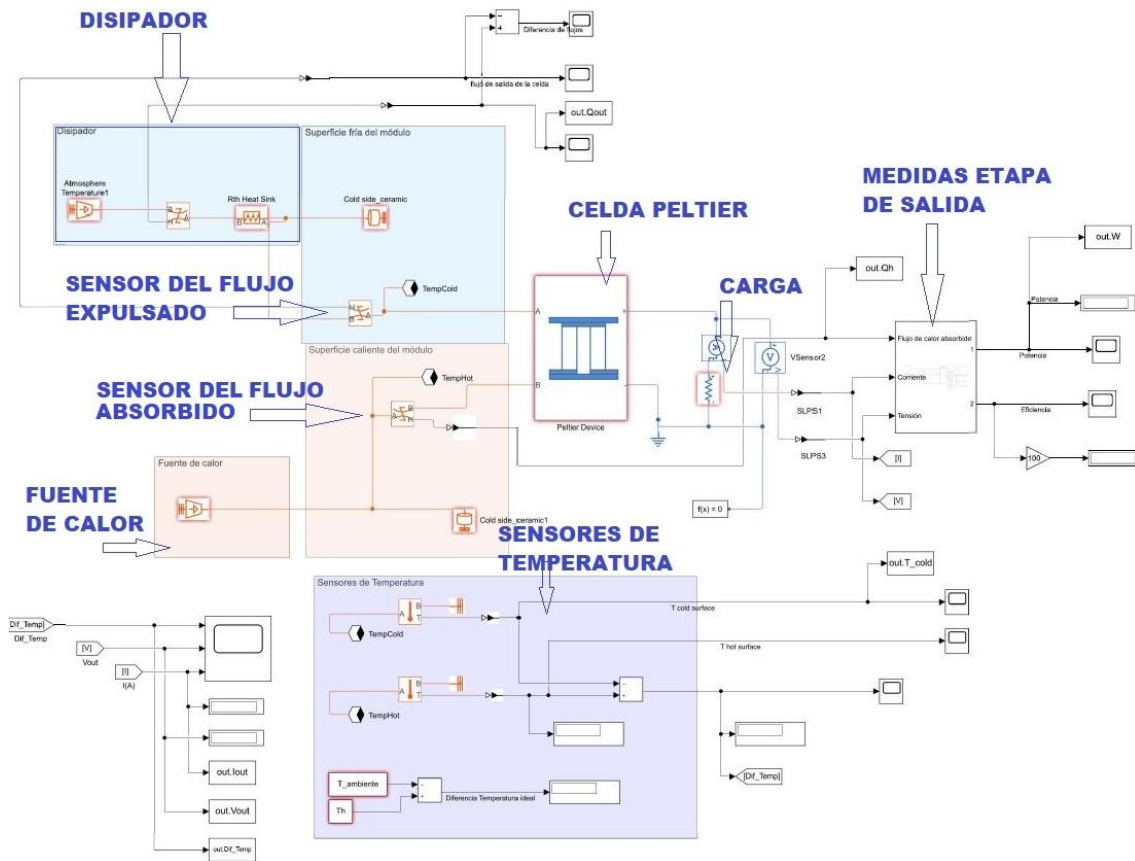


Figura 61. Esquema realizado en Simulink para la simulación de la celda peltier

Con *Simscape*, se pueden crear modelos basados en conexiones físicas que se integran directamente con diagramas de bloques. El flujo de señales es bidireccional entre bloques. Esta librería permite entender de manera más sencillas sistemas termoeléctricos como el que se ha modelado para el análisis de las celdas peltier.

Todos los parámetros del esquema están configurados en un script de MATLAB. Estos son calculados en función de la temperatura aplicada. (En el anexo se ha adjuntado el script utilizado)

El esquema sufrirá algunas modificaciones para las distintas simulaciones que se van a realizar.

6.1.1.1 Bloques del esquema

Celda Peltier

El bloque *Peltier Device* representa una celda Peltier. Convierte energía térmica en energía eléctrica y viceversa. Si la temperatura en el término B es mayor que la temperatura en el puerto térmico A, se establece una tensión positiva en el puerto eléctrico.

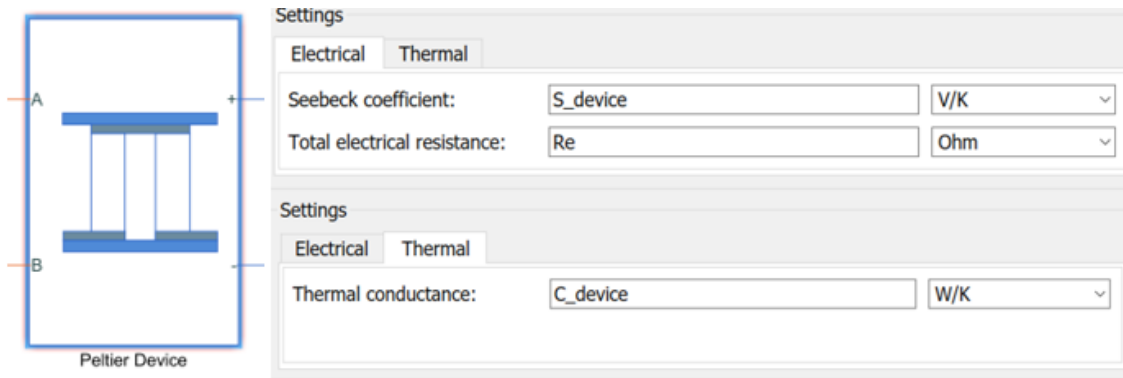


Figura 62. Bloque Peltier Device de Simulink

Los parámetros que determinan su funcionamiento son el coeficiente Seebeck total, la resistencia eléctrica y la conductancia termal de la celda.

El bloque *Thermal Mass* se ha añadido si se quiere visualizar la variación de la temperatura de la superficie fría al aplicarse una temperatura concreta.

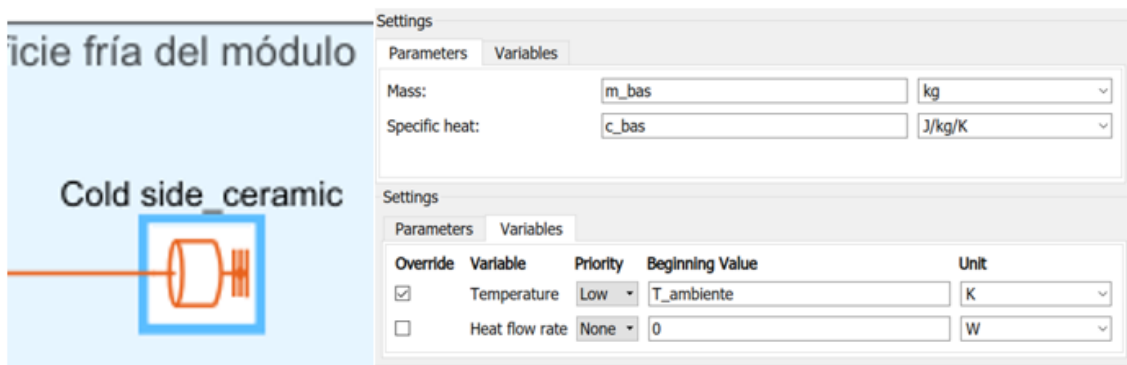


Figura 63. Bloque Thermal Mass de Simulink

La masa térmica se describe con la siguiente ecuación

$$Q_c = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (65)$$

Siendo m la masa y c , el calor específico.

Fuente de Calor

El bloque *Temperature Source* representa una fuente térmica ideal.

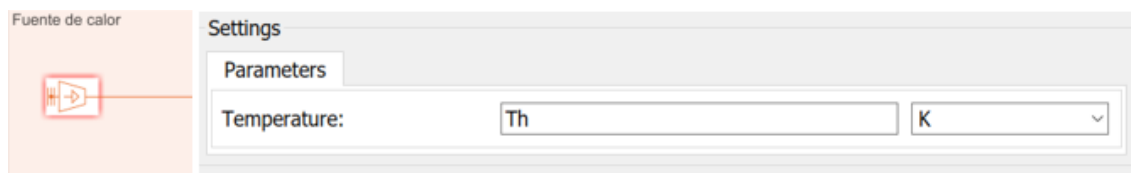


Figura 64. Bloque Temperature Source de Simulink

La temperatura en el puerto térmico B de la celda será la especificada en el parámetro del bloque, sin afectarle el flujo térmico.

Disipador

Para simular un disipador térmico se utiliza los bloques *Temperature Source* y *Thermal Resistance*.

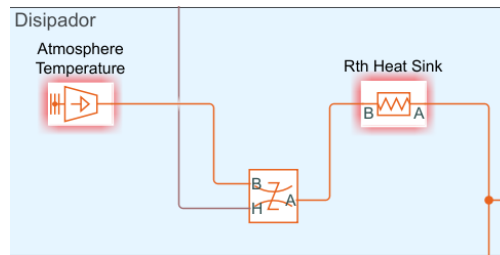


Figura 65. Bloques del esquema que componen el disipador

El bloque *Thermal Resistance* representa la resistencia al flujo de calor entre puerto térmico A, que representa la cara fría de la celda peltier, y la temperatura ambiente que se establece con el bloque *Temperature Source*.

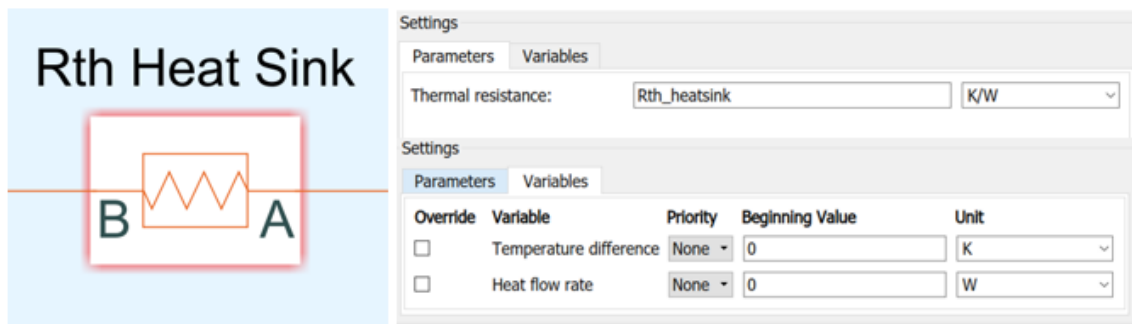


Figura 66. Bloque Thermal Resistance de Simulink

Si no se implementa este bloque, el puerto de la superficie fría de la celda estaría directamente conectado a la temperatura ambiente, por lo que se simularía un disipador ideal, es decir, se expulsaría todo el flujo de calor y la temperatura de la superficie fría se mantendría constante sin sufrir ninguna variación.

Además del valor de la resistencia termal, se puede establecer un valor inicial de diferencia de temperatura y de flujo de calor

Sensores y medidas

Para obtener las medidas reales del flujo de calor y de la temperatura en ambas caras de la celda se utiliza los bloques *Heat Flow Rate Sensor* y *Temperature Sensor*.

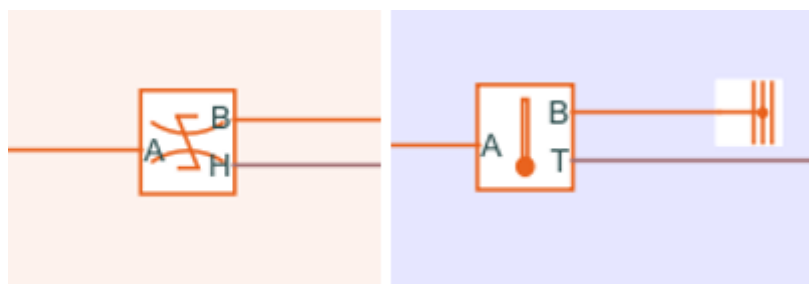


Figura 67. Bloques Heat Flow Rate Sensor y Temperature Sensor.

La dirección de flujo positiva es del puerto A al puerto B y para medir la temperatura del puerto A se necesita una referencia térmica de 0°C.

A la carga conectada al puerto eléctrico está conectado un subsistema para medir la eficiencia de la celda peltier.

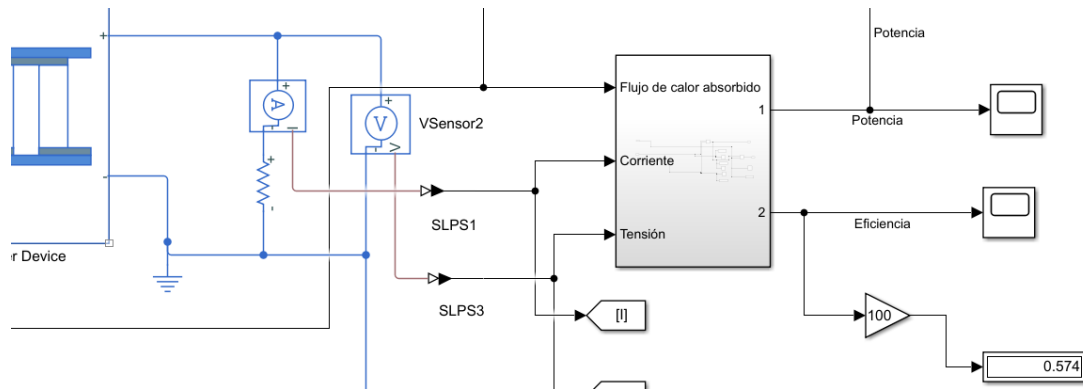


Figura 68. Medidas de la etapa de salida del esquema de Simulink

Este subsistema recoge operaciones matemáticas simples con el fin de mejorar la visibilidad del esquema.

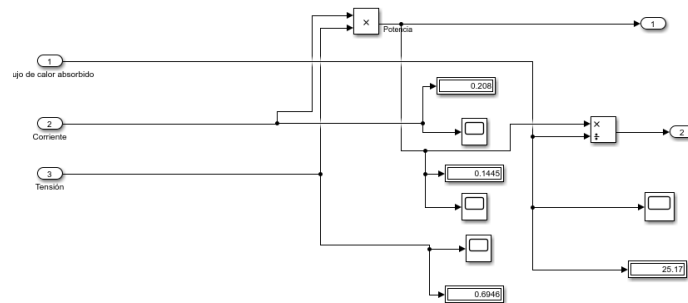


Figura 69. Bloques que conforman el subsistema de la etapa de salida del esquema

6.1.2 Dispositivos comerciales seleccionados para la simulación

Para la demostración de la simulación se ha escogido la celda peltier [GM200-127-14-16 European Thermodynamics](#).

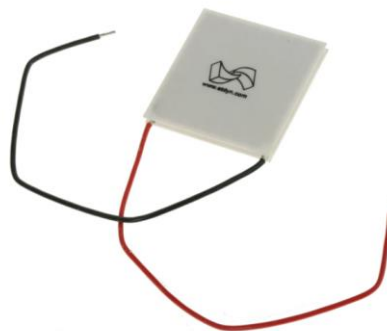


Figura 70. Celda peltier GM200-127-14-16 de European Thermodynamics. (2)

Este módulo está compuesto por 127 termopares, tiene un área de 4x4cm y un espesor total de 3.8mm. Soporta una temperatura máxima de 200°C en la cara caliente y -175°C en la cara fría.

Para las dimensiones de la celda seleccionada lo recomendable es un disipador con una base un poco mayor para asegurar la transmisión de calor. Por lo general, los disipadores más grandes ofrecen menor R_{th} , sin embargo, si la superficie de contacto es mucho más pequeña que el área

total área total de la base del disipador, seguramente no se cumpla ese valor de R_{th} . Además, incrementaría el volumen del sistema termogenerador innecesariamente.

En el portal web del distribuidor [mouser](#), para una búsqueda entre 6cm y 8cm de lado, se ha seleccionado el disipador SKV707014-CU del fabricante [Wakefield-Vette](#).

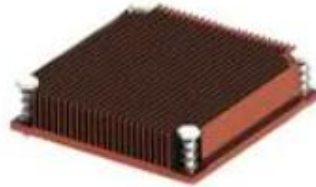


Figura 71. Disipador SKV707014-CU de Wakefield-Vette

Sus dimensiones son 69x70x14mm, es de cobre y según la hoja de especificaciones, $R_{th} = 5.60^{\circ}\text{C}/\text{W}$, con convección natural.

En unos de los apartados de la simulación se va a analizar la eficiencia de un disipador de dimensiones más grandes que extraiga el calor de dos celdas en comparación con la utilización de un disipador para cada celda. El disipador seleccionado en este caso es el modelo 511-3M, también del fabricante [Wakefield-Vette](#). Tiene una resistencia térmica de $0.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ y sus dimensiones son 132.33x76.2x59.69mm. Al tener mayor superficie tiene menos resistencia térmica, pero en este caso tendrá que disipar el doble de flujo de calor.

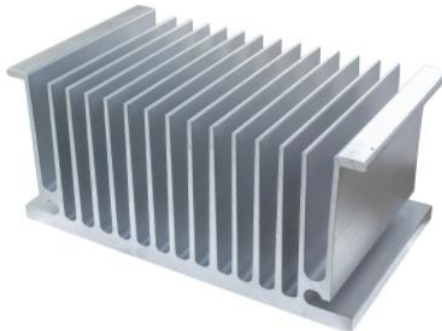


Figura 72. Disipador 511-3M de Wakefield-Vette.

Si se desea agrupar cuatro celdas en un mismo disipador podríamos seleccionar el disipador [511-6M](#) o el [511-6U](#). Ambos tienen una resistencia térmica de $0.6^{\circ}\text{C}/\text{W}$ y unas dimensiones de 132.33x152.4x59.69mm y 132.33x152.4x61.21mm respectivamente.

6.1.3 Cálculo de las propiedades termoeléctricas de la celda

Las propiedades termoeléctricas han sido calculadas por el método de mínimos cuadrados no lineales utilizando los coeficientes del Bi_2Te_3 .

La variación del coeficiente Seebeck, la conductividad térmica y la resistividad eléctrica desde 30°C a 200°C se puede visualizar en la Figura 73.

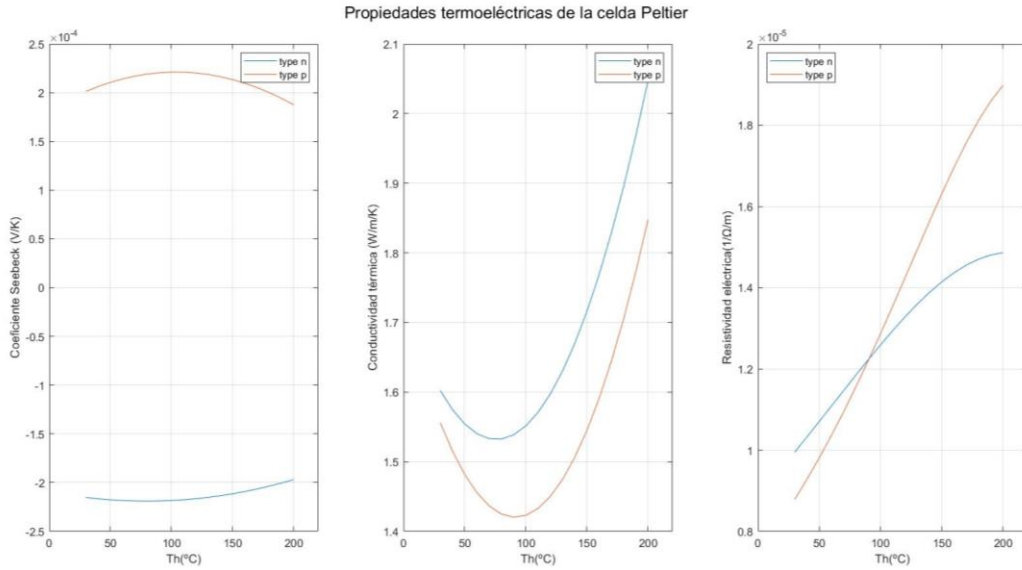


Figura 73. Curvas obtenidas del coeficiente Seebeck, Conductividad térmica y resistividad eléctrica de GM200-127-14-16

Para obtener la resistencia interna y la conductancia termal, debemos conocer las dimensiones de la celda, además del valor de ρ_p , ρ_n , k_n , k_p y del número de termopares.

En el Datasheet del módulo GM200-127-14-16 se informa que los termopares tienen una altura de 3.4mm. La altura total de la celda es 3.8mm. Por lo tanto, el espesor de cada una de las bases cerámicas es de 0.2mm.

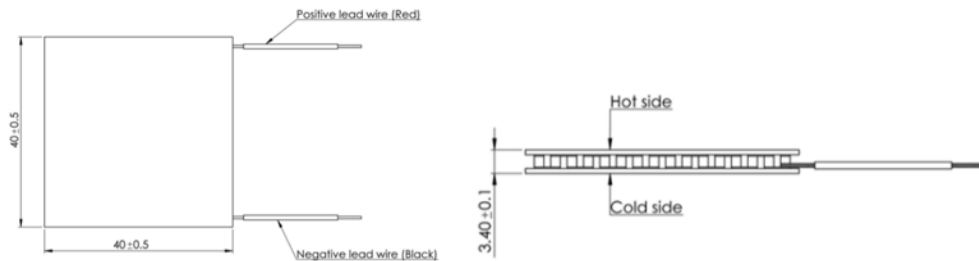


Figura 74. Dimensiones del GM200-127-14-16

El área total de la base es 40x40cm, pero no se especifica el espacio que ocupa el conjunto de termopares. La mayoría de los fabricantes no facilitan este dato.

Para calcular el área de cada termopar se utilizará la información proporcionada en la hoja de especificaciones.

Parameters for hot side temp 200°C and cold side temp 30°C

Matched load output power	4.73W
Matched load resistance	3.34Ω ± 15%
Open circuit voltage	7.95V
Matched load output	1.19A
Matched load output voltage	3.98V
Heat flow through module	~94.6W
Maximum compress (non-destructive)	1MPa
Maximum operation temperature	Hot side - 200°C. Cold side - 175°C

Figura 75. Parámetros del Datasheet GM200-127-14-16 para el cálculo de R_{in}

Si se aplica 200°C en la superficie caliente y 30°C en la superficie fría la tensión de salida es 3.98V y la corriente 1.19^a (para $R_L = 3.34 \pm 15\%$). Haciendo uso de la expresión de la tensión de salida (39).

$$R_{in} = \frac{n \cdot \alpha_{200^\circ C} (T_H - T_C) - V_L}{I}$$

Siendo $n = 127$ termopares y $\alpha_{200^\circ C} = \alpha_{p,200^\circ C} - \alpha_{n,200^\circ C} = 384.5 \mu V/K$ (calculado a partir de los coeficientes del Bi_2Te_3)

$$R_{in(200^\circ C)} = \frac{127 \cdot 384.5 \mu \frac{V}{K} \cdot (200^\circ C - 30^\circ C) - 3.98V}{1.19A} = 3.63\Omega$$

Una vez obtenido $R_{in(200^\circ C)}$ podemos calcular el área de cada termopar a partir de la expresión de la resistencia interna (22).

$$A_{tem} = 2 \cdot \frac{n \cdot H_{tem}}{R_{in}} (\rho_{p,200^\circ C} + \rho_{n,200^\circ C})$$

$$A_{tem} = 2 \cdot \frac{127 \cdot 0.34m}{3.63\Omega} (1.898 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m + 1.486 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m) = 8.048 \cdot 10^{-6} m^2$$

Por lo tanto, cada termopar ocupa 8.048 mm² y el conjunto de termopares 10.22 cm², un 64% de la superficie total de la celda.

Conocidos el número de termopares y sus dimensiones, ya podemos calcular los parámetros S, R_{in} y C totales de la celda peltier seleccionada:

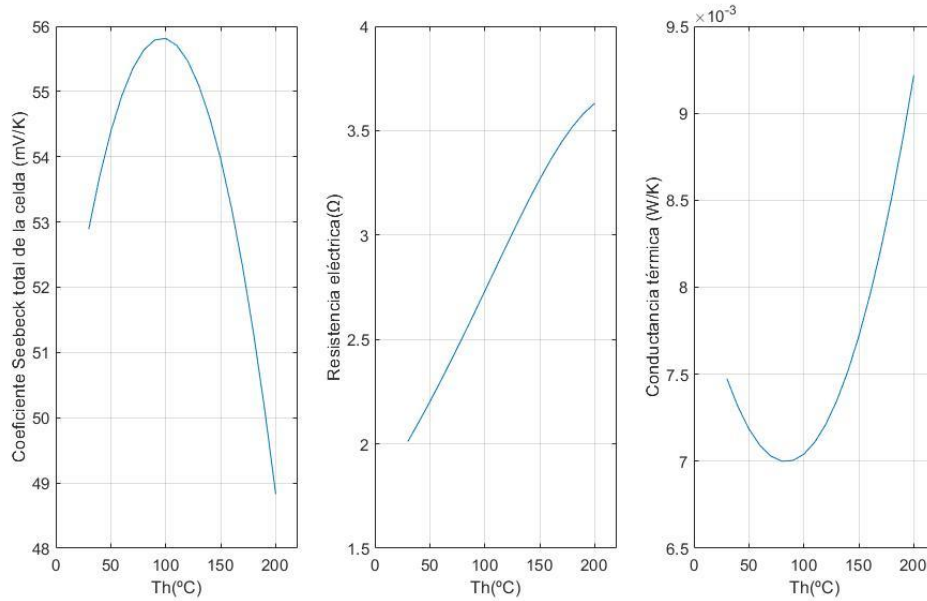


Figura 76. Curvas obtenidas del coeficiente Seebeck total resistencia eléctrica y conductancia térmica de GM200-127-14-16

Se puede observar que R_{in} aumenta su valor de forma proporcionada a la temperatura. En cambio, el coeficiente S total de la celda disminuye a partir de los 100°C.

C ha sido calculada considerando, además del material termoeléctrico, las bases cerámicas. Su evolución respecto a la temperatura es inversa a S.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la simulación, comparamos los resultados con las variaciones V, W e I de las gráficas del Datasheet para $R_L = 3.34 \pm 15\%$ y en condiciones ideales (la cara fría no aumenta su temperatura).

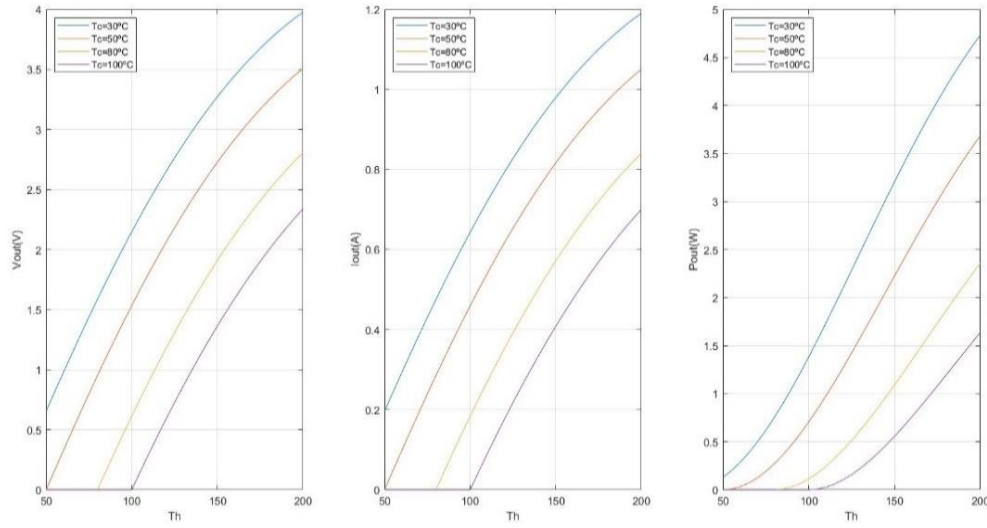


Figura 77. Curvas obtenidas de la tensión, corriente y potencia de GM200-127-14-16

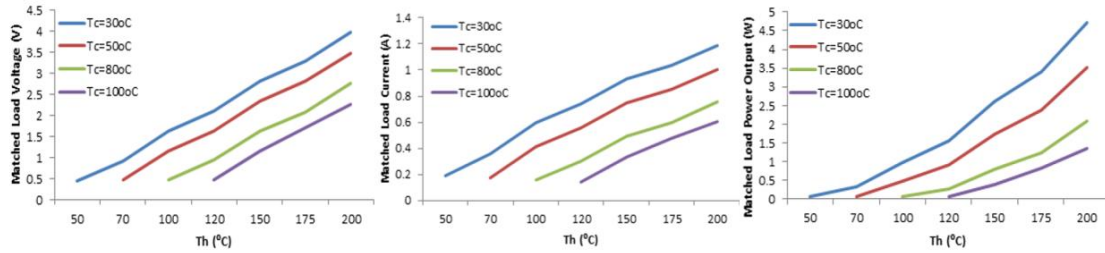


Figura 78. Curvas de la tensión, corriente y potencia del Datasheet del GM200-127-14-16

Los valores de la simulación obtenidos son aproximados bastante a los del fabricante.

La forma de las señales varía ligeramente debido a que los saltos de valores del rango de temperatura que se ha simulado son pequeños.

6.1.4 Simulación: Estimulación y representación

En todas las simulaciones que se van a realizar se aplica una fuente de calor ideal, no sufre pérdidas, y no se tienen en consideración interfaces térmicas como pueden ser láminas de grafito o pasta térmica.

El rango seleccionado para la simulación en función de la carga conectada es desde 0.05Ω a 9Ω y para las simulaciones de asociaciones de celdas de 0.05Ω a 15Ω .

En la simulación de la celda peltier en función de la resistencia térmica equivalente del disipador el rango aplicado es de $0.001\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ (disipa todo el flujo de calor saliente) hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Las temperaturas a las que se va a someter la celda para su análisis son $T_h = 50^{\circ}\text{C}$, 100°C , 150°C y 200°C . La Tabla 7 recoge los parámetros de la celda al aplicar estas temperaturas.

Tabla 7. Parámetros introducidos de la celda peltier seleccionada para la simulación

Parámetros de la celda para la simulación				
T_h (°C)	50	100	150	200
R_{in} (Ω)	2.20	2.73	3.27	3.63
S (mV/K)	54.38	55.81	53.96	48.83
C_{total} (W/K)	$7.19 \cdot 10^{-3}$	$7.04 \cdot 10^{-3}$	$7.72 \cdot 10^{-3}$	$9.22 \cdot 10^{-3}$

De los resultados obtenidos, se van a analizar la variación de los parámetros que determinan la efectividad del sistema: V_{oc} , V_L , I , ΔT , T_c , Q_h , Q_c y P_{OUT} .

En el anexo se ha añadido el script utilizado para la representación de los resultados de una de las simulaciones. El resto de los archivos script y los esquemas de Simulink utilizados se han añadido a la carpeta comprimida que reúne todos los archivos del proyecto.

6.1.5 Simulación de la celda peltier en función de la carga y en condiciones ideales

La primera simulación que se va a realizar es para analizar el comportamiento de la celda peltier en función de la carga en condiciones ideales, es decir, se consigue disipar todo el flujo de calor de la superficie fría de la celda.

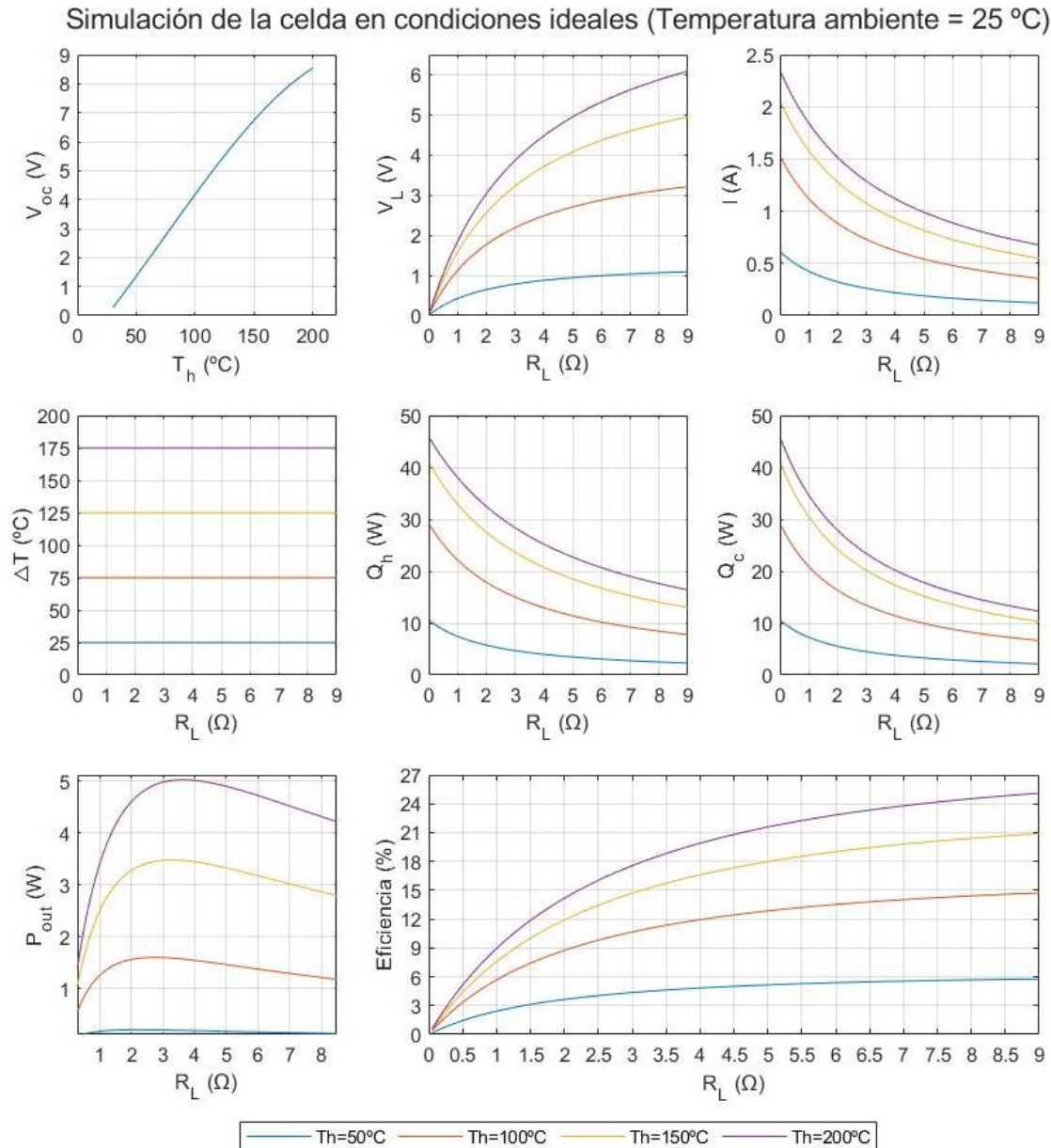


Figura 79. Resultados de simulación de la celda peltier en función de la carga y en condiciones ideales

La tensión máxima obtenida en el puerto eléctrico de la celda peltier en circuito abierto es de 8.4V cuando la temperatura aplicada a la superficie caliente es de 200°C.

Al conectar una carga, la tensión generada se ve afectada por el valor de esta. Para valores de R_L menores a R_{in} , V_L disminuye considerablemente. Para $R_L > R_{in}$, V_L aumenta, aunque la curva se suaviza. El efecto en I , es inverso a V_L .

La diferencia de temperatura se mantiene constante debido a que se está aplicando un disipador ideal, se consigue expulsar todo el flujo de calor que desprende la superficie fría de la celda peltier.

En cuanto al flujo de calor absorbido y expulsado vemos que son iguales cuando la salida está cortocircuitada ($R_L = 0$) y ambas disminuye su valor al aumentar R_L .

La máxima transferencia de potencia se produce cuando $R_L = R_{in}$. Al aplicar 50°C , la celda produce unos pocos mW de potencia de salida máxima mientras que para $T_h=200^\circ\text{C}$ produce hasta 5W.

La eficiencia energética incrementa su valor de forma correspondiente al valor de R_L . Esto se debe a que disminuye el flujo de calor absorbido. Al aumentar R_L disminuye I y por lo tanto disminuye la cantidad de calor producida por efecto Joule que absorbe la superficie caliente ($Q_{j,h} = \frac{1}{2} I^2 R_{in}$).

Además, se puede observar que la celda también mejora su efectividad en proporción a la temperatura, alcanzando un máximo del 25% para 200°C cuando $R_L \geq 3R_{in}$.

En el caso de que conectáramos cargas pequeñas, como, por ejemplo, sensores inalámbricos, la eficiencia de la celda se reduce considerablemente ya que se genera menos potencia y el flujo de calor absorbido es más grande.

6.1.6 Simulación de la celda peltier en función del disipador

El disipador de calor tiene una transcendencia muy importante en el rendimiento de la celda. Para visualizar su efecto se ha parametrizado el valor de la resistencia térmica equivalente de un disipador con convección natural.

Simulación de la celda en función del disipador ($R_L = 2.5 \Omega$; Temperatura ambiente = 25°C)

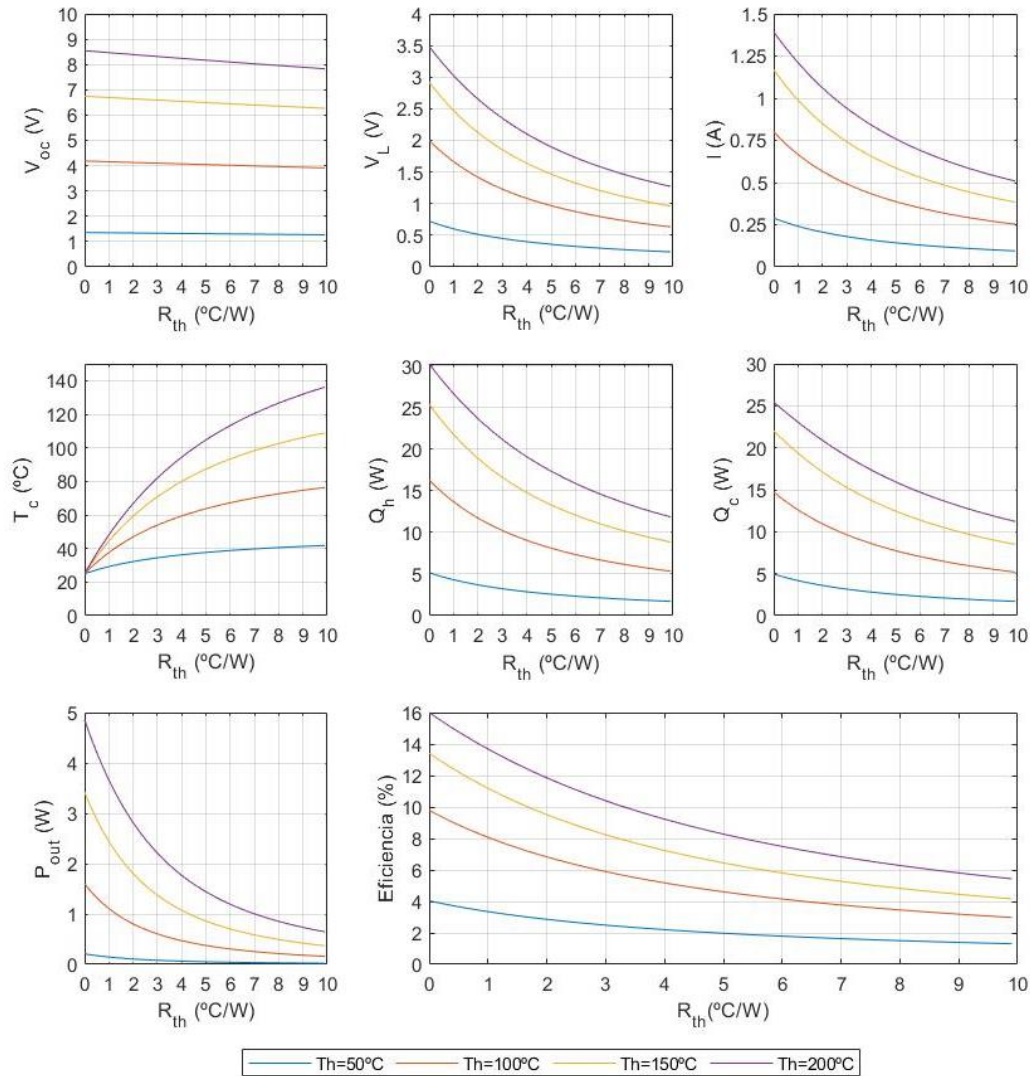


Figura 80. Resultados de simulación de la celda peltier en función del disipador

La tensión en circuito abierto no se ve afectada ante el aumento de la resistencia equivalente térmica del disipador, perdiendo unos pocos mV. Sin embargo, al conectar una carga, en este caso de 2.5Ω , el flujo de calor varía por efecto Peltier y Joule. En función del disipador podrá remover en mayor o menor medida el calor que expulsa por la superficie fría.

En el rango de R_{th} introducido. Al aplicar 200°C , vemos que puede aumentar hasta 140°C la temperatura de la cara fría. El flujo de calor absorbido también disminuye puesto que se reduce la corriente que circula y la diferencia de temperatura es menor.

La variación negativa de la P_{OUT} es mucho mayor que Q_h , por lo tanto, la efectividad de la celda desciende considerablemente.

6.1.7 Simulación de la celda peltier con disipador comercial en función de la carga

A continuación, se va a simular el comportamiento de la celda peltier con el disipador comercial seleccionado en función de la carga conectada. Este disipador tiene una resistencia equivalente térmica de $5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Simulación de la celda en función de la carga ($R_{th}=5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Temperatura ambiente = $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

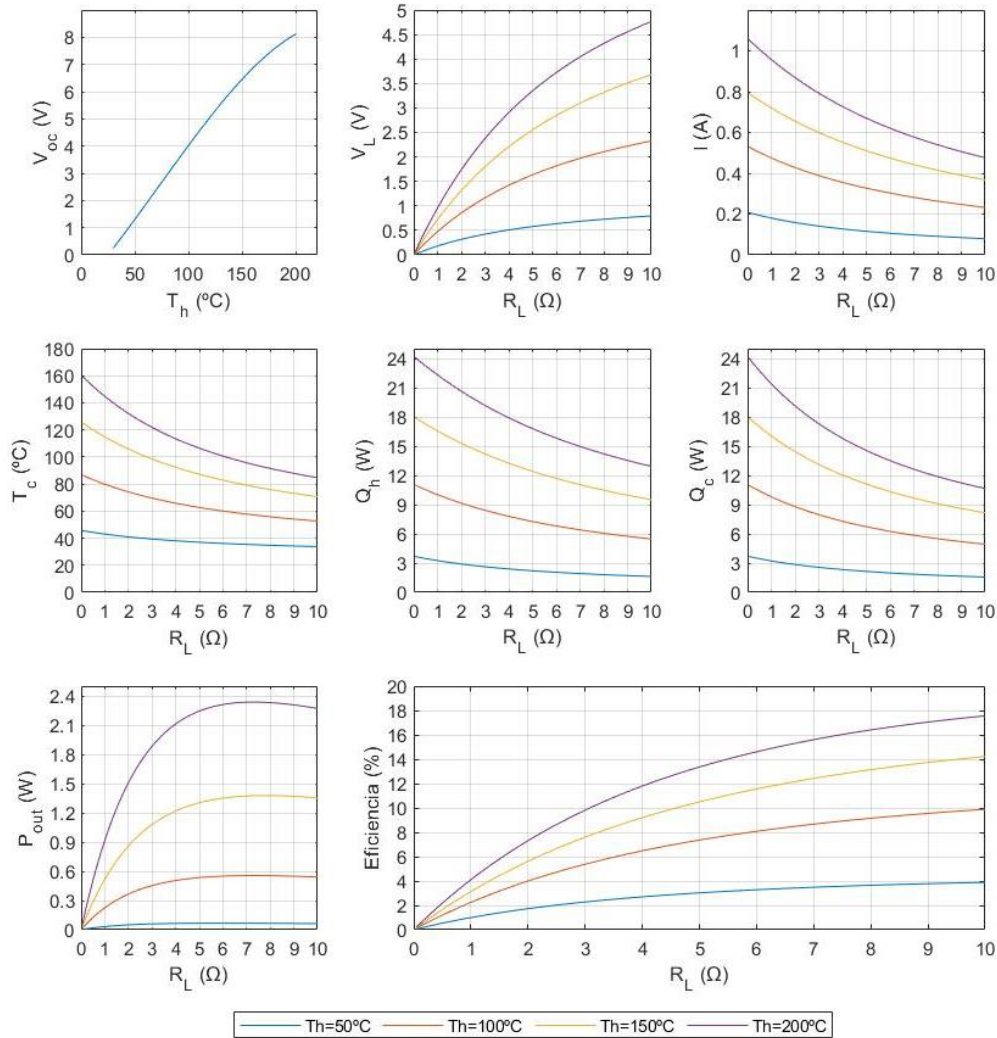


Figura 81. Resultados de la simulación de la celda peltier con disipador comercial en función de la carga

Aunque disminuya T_c y aumente V_L , el aumento R_L también es negativo para la celda ya que I disminuye un 50% en el rango seleccionado. Además, la máxima transferencia de potencia no se produce para $R_L = R_{in}$ debido a los efectos termodinámicos del sistema.

La celda generará un máximo de 2W y tendrá una eficiencia máxima de casi el 18% para $T_h = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para $T_h = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, la celda consigue generar 100mW ya que la diferencia de temperatura entre las caras es muy pequeña con el disipador seleccionado.

6.1.8 Simulación con asociaciones de celdas peltier

Una vez analizado el rendimiento de una celda peltier, se va a analizar la asociación de celdas, en distintas topologías, utilizando cada celda un disipador con el mismo valor de R_{th} .

6.1.8.1 Asociación en serie

En este caso la salida del puerto eléctrico de la celda peltier añadida se ha conectado en serie con la otra celda.

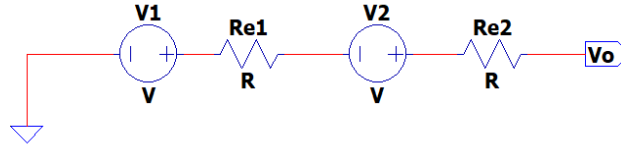


Figura 82. Circuito eléctrico equivalente de la asociación en serie de dos celdas peltier

Resultados de la simulación:

Simulación de dos celdas en serie ($R_{th}=5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Temperatura ambiente = $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

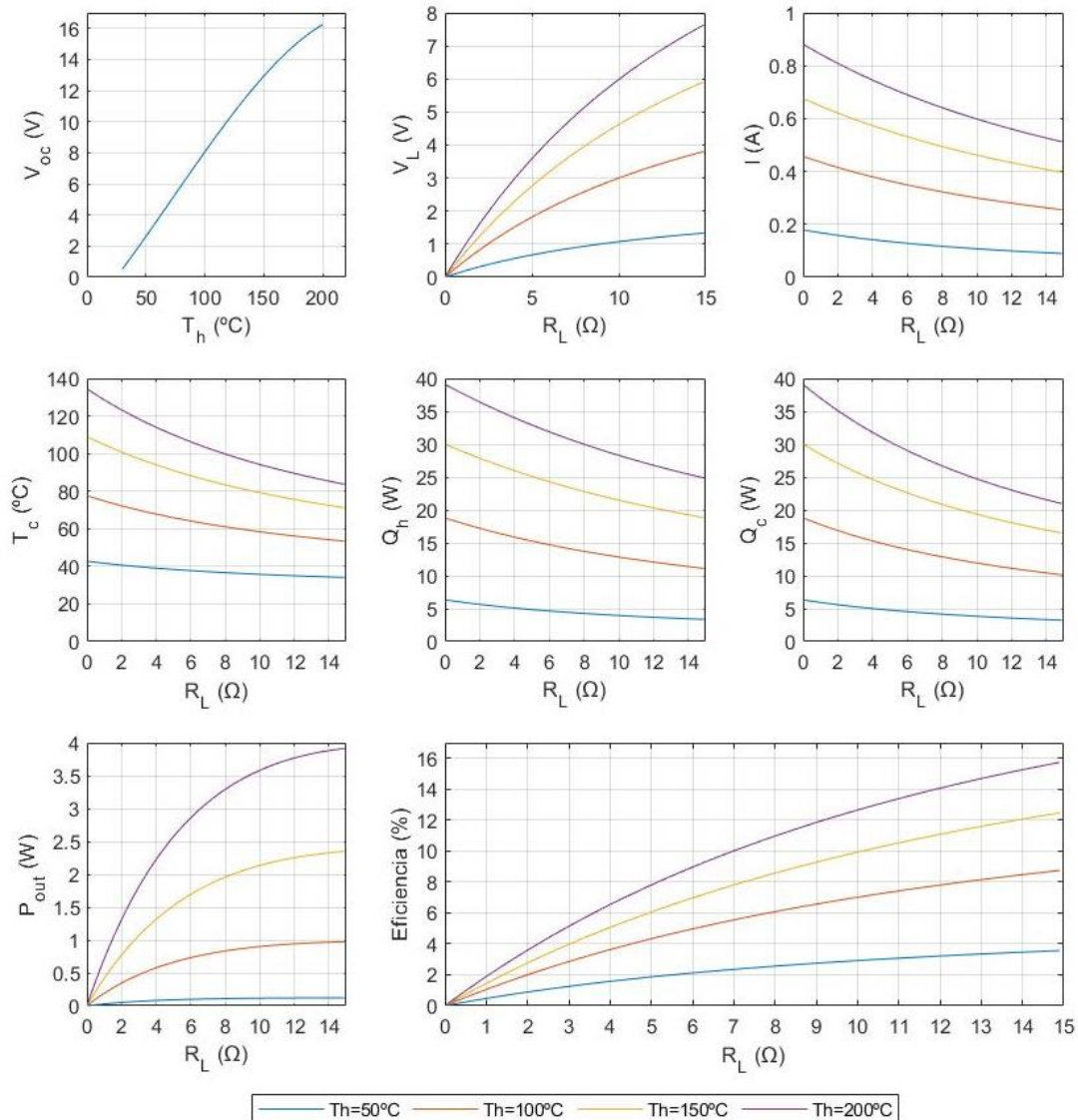


Figura 83. Resultados de la simulación con asociación en serie

Con la asociación en serie, si se tratara de generadores eléctricos ideales, esperaríamos doblar el voltaje de salida, sin embargo, con las celdas peltier, al conectar una carga, esto no ocurre debido a los distintos fenómenos que se han mencionado anteriormente. V_L aumenta un par de voltios mientras que I disminuye ligeramente. La temperatura de la cara fría será la misma ya que se les aplica la misma intensidad de calor y el disipador conectado a cada una de ellas es el mismo. El calor absorbido total no llega al doble del que puede generar una celda, pero la variación de la potencia es menor. Además, P_{out} aumenta en proporción a R_L .

Por lo tanto, cuando asociamos celdas peltier en serie, reducimos la eficiencia energética total.

6.1.8.2 Asociación en paralelo

Al esquema original se ha añadido otra celda peltier de las mismas características conectando su puerto eléctrico a la carga consiguiendo así una conexión en paralelo de dos celdas peltier iguales.

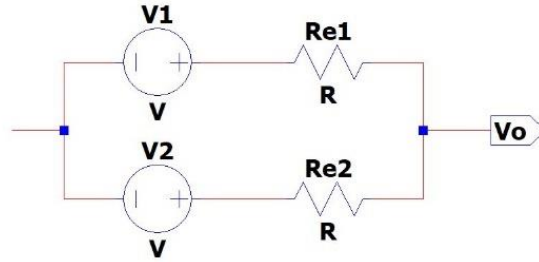
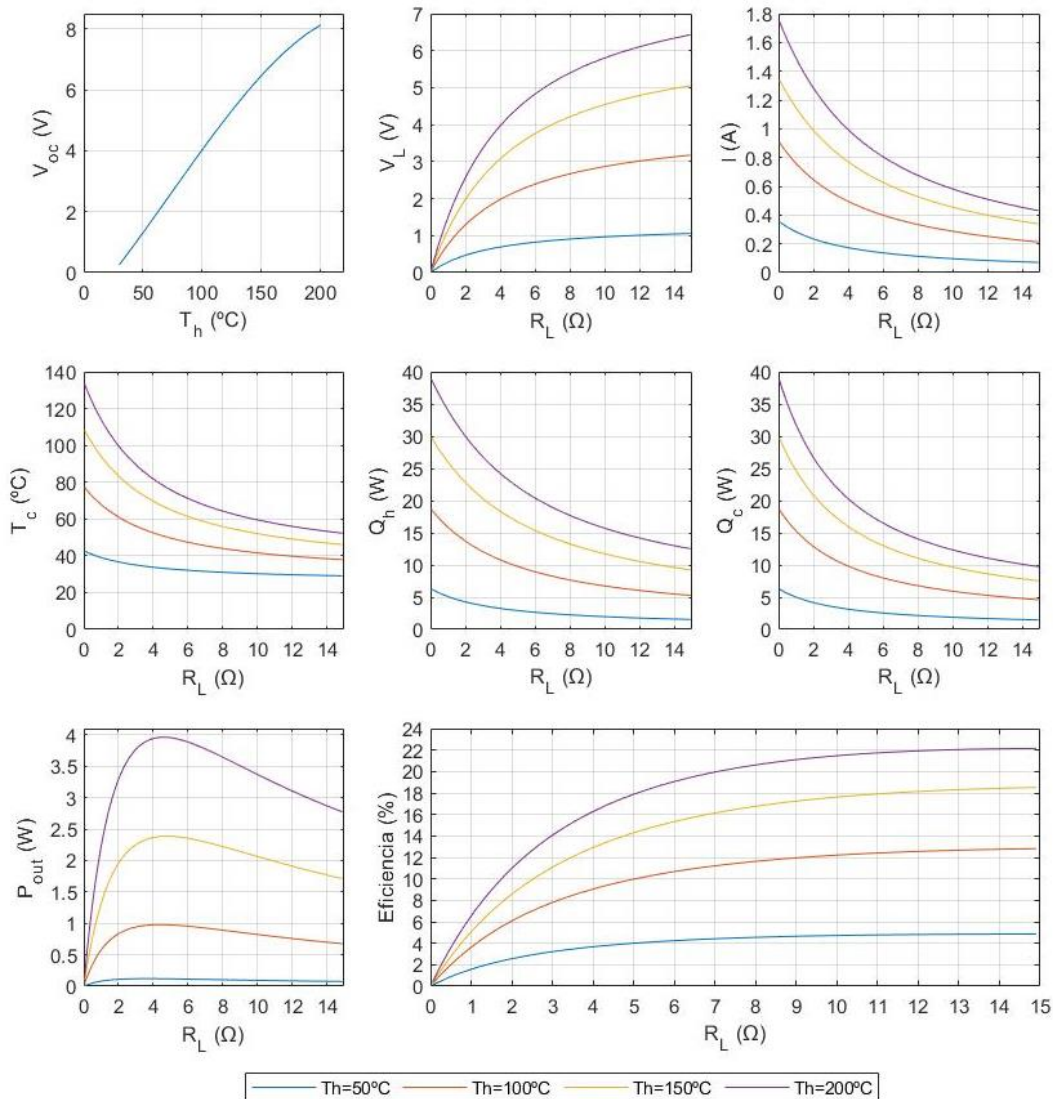


Figura 84. Circuito eléctrico equivalente de la asociación en paralelo de dos celdas peltier

Resultados de la simulación:

Simulación de dos celdas en paralelo ($R_{th}=5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Temperatura ambiente = $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Con la conexión en paralelo conseguimos doblar la corriente que circula por la carga y aumenta levemente la tensión de salida (1V respecto al voltaje entregado por una celda). A diferencia de

la conexión en serie, donde la resistencia interna del sistema se duplica, con la conexión en paralelo, la máxima transferencia de potencia se centra en $R_L = R_{in}$.

Esta configuración es más eficiente que la conexión en serie y levemente mayor que con una sola celda.

6.1.8.3 Asociación mixta tipo 1

Si utilizamos una configuración simétrica de cuatro celdas, la temperatura de la superficie fría y el flujo de calor es el mismo en todas las celdas, ya que, se emplea el mismo modelo, el mismo disipador y la misma fuente de calor.

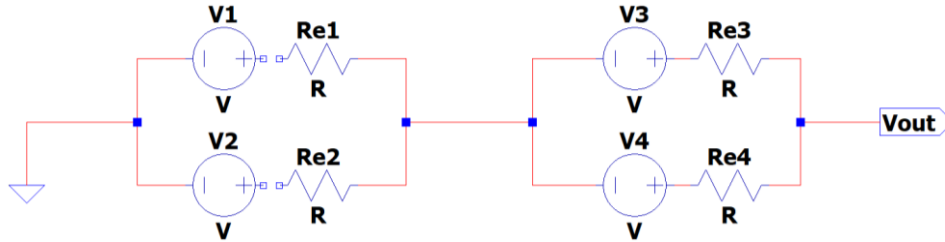


Figura 86. Circuito eléctrico equivalente de la asociación mixta simétrica de cuatro celdas peltier

En la práctica, esto puede cambiar, ya que puede darse el caso de que no todas las celdas absorban la misma cantidad de calor o que el flujo expulsado interfiera en una celda contigua.

Resultados de la simulación:

Simulación mixta tipo 1 ($R_{th}=5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Temperatura ambiente = $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

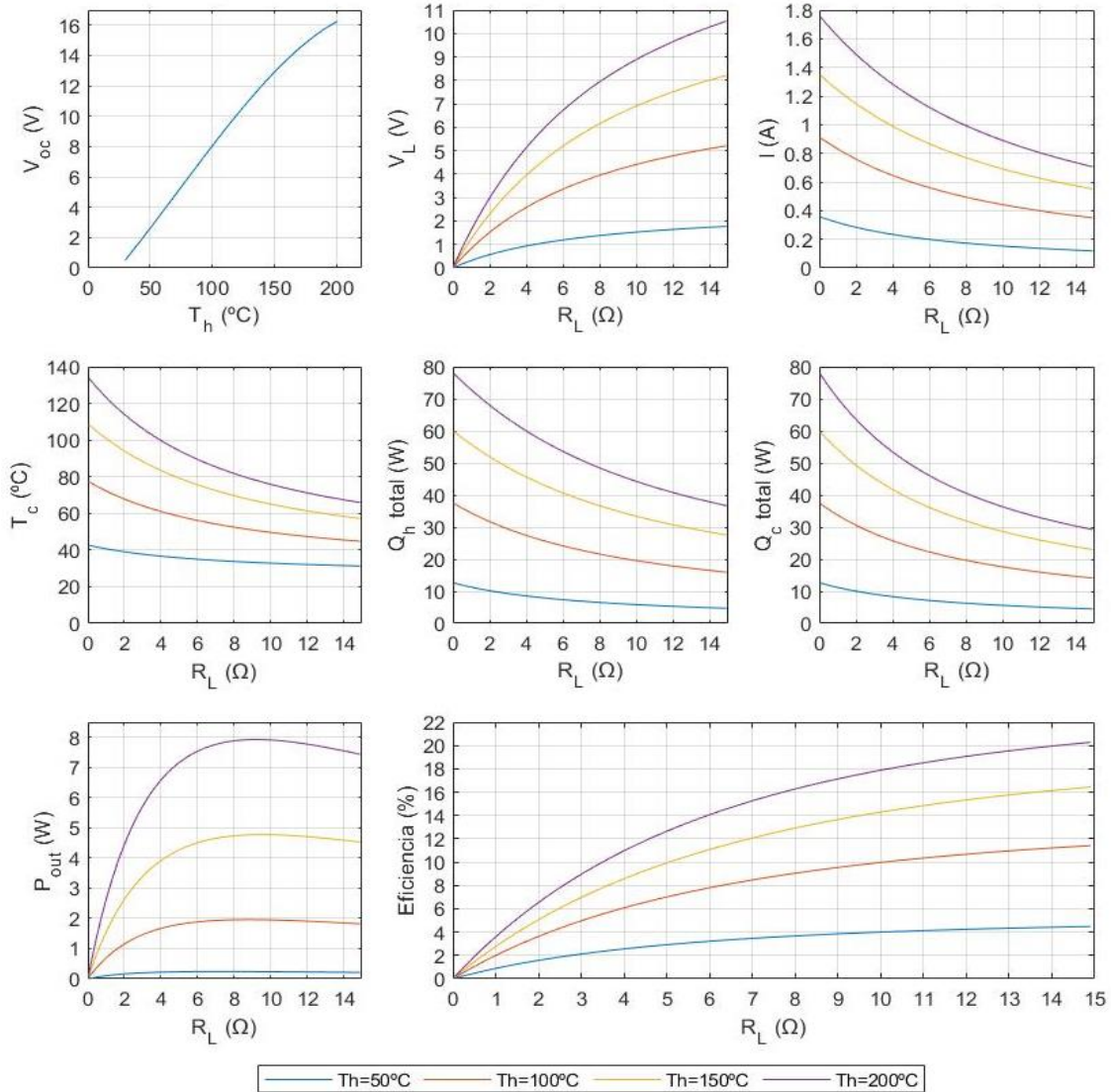


Figura 87. Resultados de la simulación con asociación mixta tipo 1

Con esta configuración, aunque la efectividad del sistema disminuya un 2% respecto a la conexión en paralelo de dos celdas, se consigue doblar la potencia máxima de salida. T_c de cada una de las celdas disminuye mientras que V_L e I mejoran considerablemente.

6.1.8.4 Asociación mixta tipo 2

En este caso, se va a simular una asociación mixta asimétrica. Dos celdas peltier en paralelo conectadas a otra celda en serie.

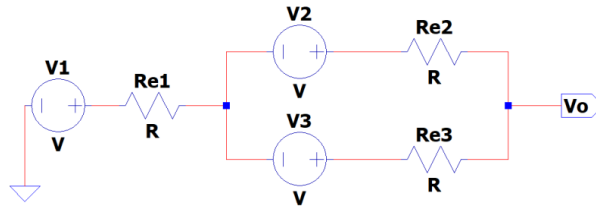


Figura 88. Circuito eléctrico equivalente de la asociación mixta de tres celdas peltier

Resultados de la simulación:

Simulación mixta tipo 2 ($R_{th}=5.60\text{ }^{\circ}\text{C/W}$; Temperatura ambiente = $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

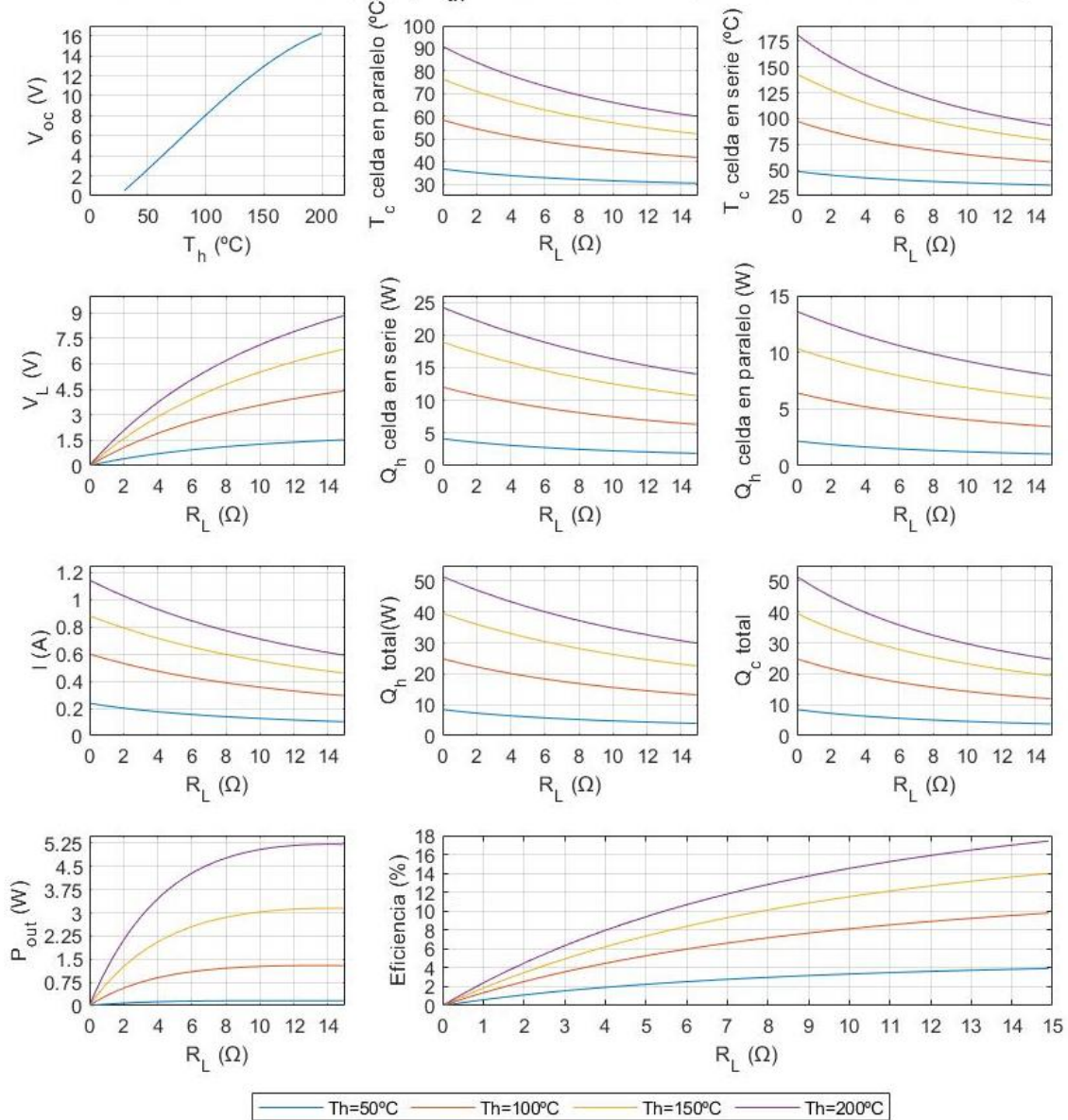


Figura 89. Resultados de la simulación con asociación mixta tipo 2

En la celda en serie, tanto el flujo de calor como la temperatura de la cara fría, tendrán distintas variaciones respecto a las celdas en paralelo. Con esta configuración se consigue mejorar los resultados de la conexión en serie de dos celdas, pero la potencia generada queda lejos de la asociación mixta vista en el caso anterior.

6.1.8.5 Asociación de celdas con un solo disipador

Hasta ahora se ha analizado la asociación de varias celdas peltier utilizando cada una un disipador. A continuación, se va a simular el rendimiento de la asociación en paralelo de dos celdas peltier que utilizan el mismo disipador comparando los resultados con los obtenidos anteriormente.

El disipador escogido para esta configuración, (Figura 71), tiene una resistencia térmica de $0.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

Una vez introducido el parámetro de R_{th} y cambiado las conexiones de las celdas peltier para que el flujo total expulsado sea disipado por un solo disipador los resultados obtenidos de la simulación son los siguientes:

Dos celdas en paralelo compartiendo disipador ($R_{th}=0.90^{\circ}\text{C}/\text{W}$; Temperatura ambiente = 25°C)

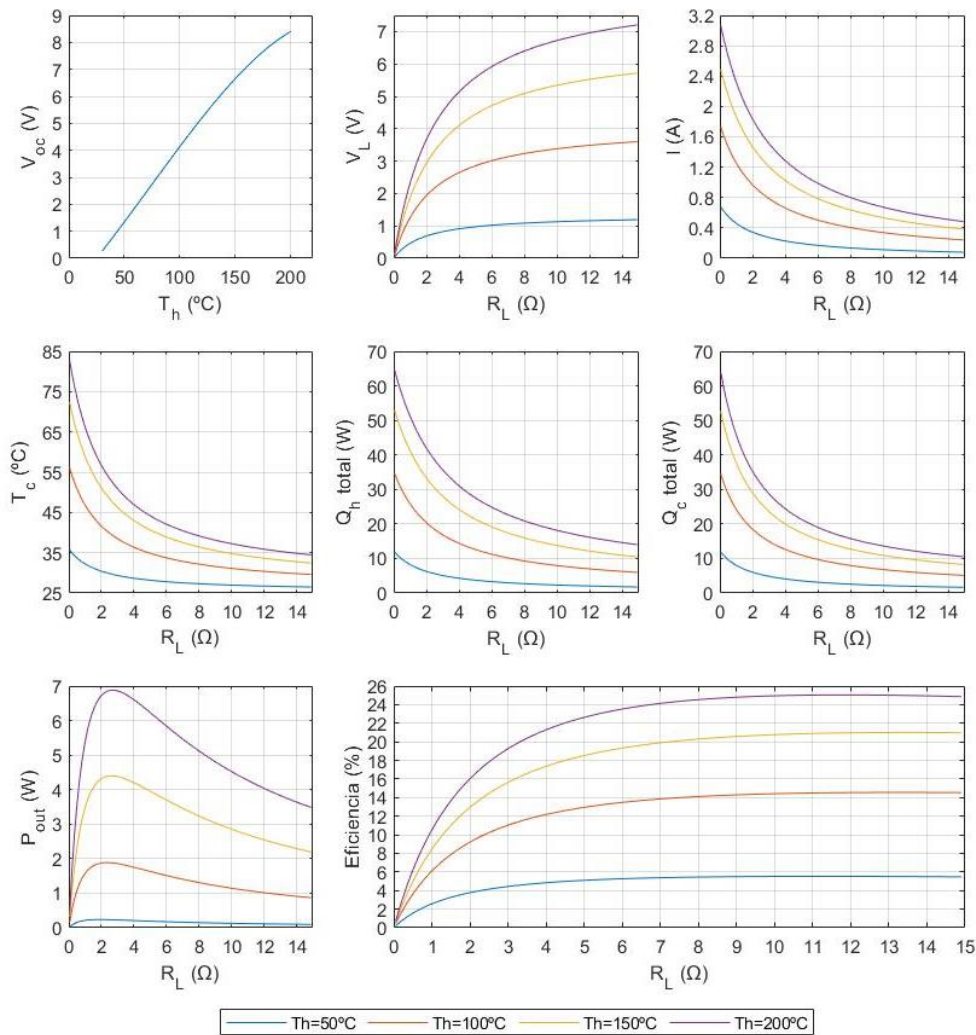


Figura 90. Resultados de la simulación en paralelo con un solo disipador

Comparando con los datos obtenidos en la asociación en paralelo se obtiene una gran mejora en cuanto a la corriente que circula por la carga, la cantidad de calor que se remueve es mucho mayor, y por consiguiente el flujo de calor y la temperatura de la cara fría mejoran considerablemente.

La eficiencia aumenta hasta un 3%. Se consigue una eficiencia máxima del 25% para $T_h = 200^{\circ}\text{C}$. Es necesario apuntar, que la posible mejora de utilizar un solo disipador depende de las propiedades térmicas del mismo.

6.2 Simulación del regulador de tensión

Para la simulación del diseño propuesto para la regulación de la tensión de salida de las celdas peltier se ha utilizado LTspice. Se trata de un programa de simulación de circuitos integrados desarrollado por el fabricante *Analog Devices* que permite visualizar las formas de onda para distintas configuraciones.

Se va a simular los dos reguladores por separado ya que, si implementáramos el esquema con ambos dispositivos, los tiempos de simulación serían de larga duración.

Puesto que en este software no se puede simular supercondensadores, se han sustituido por condensadores electrolíticos para observar a partir de que tensiones de entradas comienza a activarse las distintas funcionalidades.

Más adelante podremos analizar los tiempos de carga con un esquema realizado en MATLAB/Simulink.

6.2.1 Simulación del LTC3106

El esquema que se va a simular para analizar su funcionamiento es el de la Figura 91.

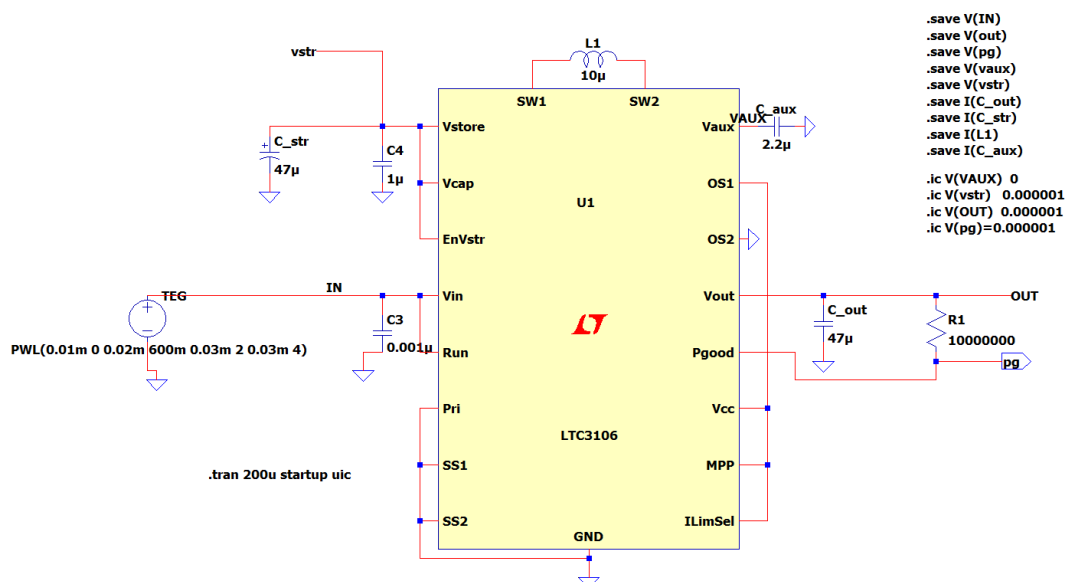


Figura 91. Esquema de la simulación del LTC3106

La fuente de tensión que representa a la celda peltier se ha configurado para que en un primer instante aplique 3V y a los 0.25s, 0.10V.

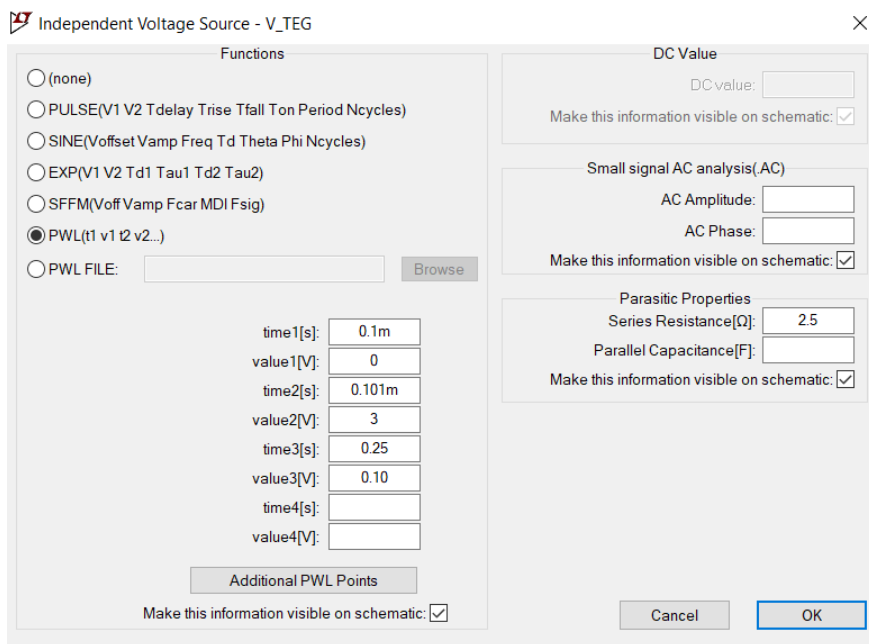


Figura 92. Parámetros de la tensión de entrada para la simulación del LTC3106

Se le ha añadido una resistencia en serie de 2.5Ω por la resistencia interna de la celda. Esta resistencia se ha visto que varía su valor en función de la temperatura.

La Tabla 8 recoge los valores de la resistencia interna de la celda peltier simulada en el apartado anterior ante diferentes temperaturas.

Tabla 8. Parámetros obtenidos de la celda GM200-127-14-16 con disipador SKV707014-CU

GM200-127-14-16 con disipador SKV707014-CU ($R_{th} = 5.60^{\circ}\text{C}/\text{W}$) $T_{ambiente}=25^{\circ}\text{C}$		
$T_h (^{\circ}\text{C})$	$V_{oc} (\text{V})$	$R_{in}(\Omega)$
30	0.25	2.01
40	0.77	2.10
50	1.31	2.20
60	1.85	2.30
70	2.40	2.41
80	2.94	2.51
90	3.49	2.62
100	4.03	2.73
110	4.55	2.84
120	5.06	2.95
130	5.56	3.06
140	6.02	3.17
150	6.47	3.27
160	6.88	3.36
170	7.25	3.45
180	7.59	3.52
190	7.88	3.58
200	8.13	3.63

El valor de entrada del regulador, V_{IN} , estará condicionado por R_{IN} . Dependiendo del número de celdas y el tipo de asociación, R_{IN} puede aumentar.

Resultados de la simulación:

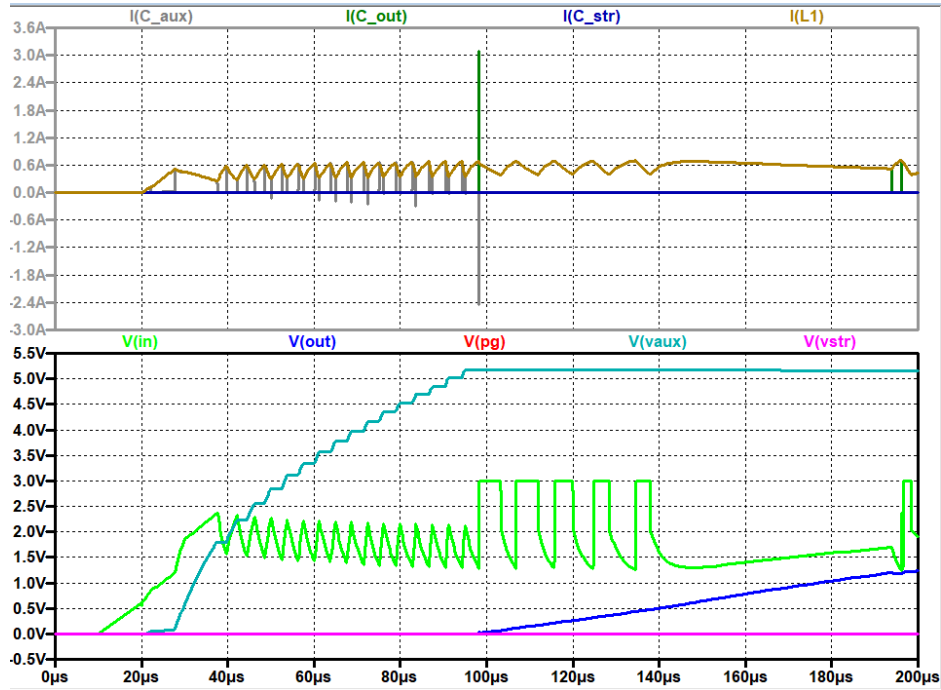


Figura 93. Curvas de tensiones y corrientes en el arranque de la simulación del LTC3106

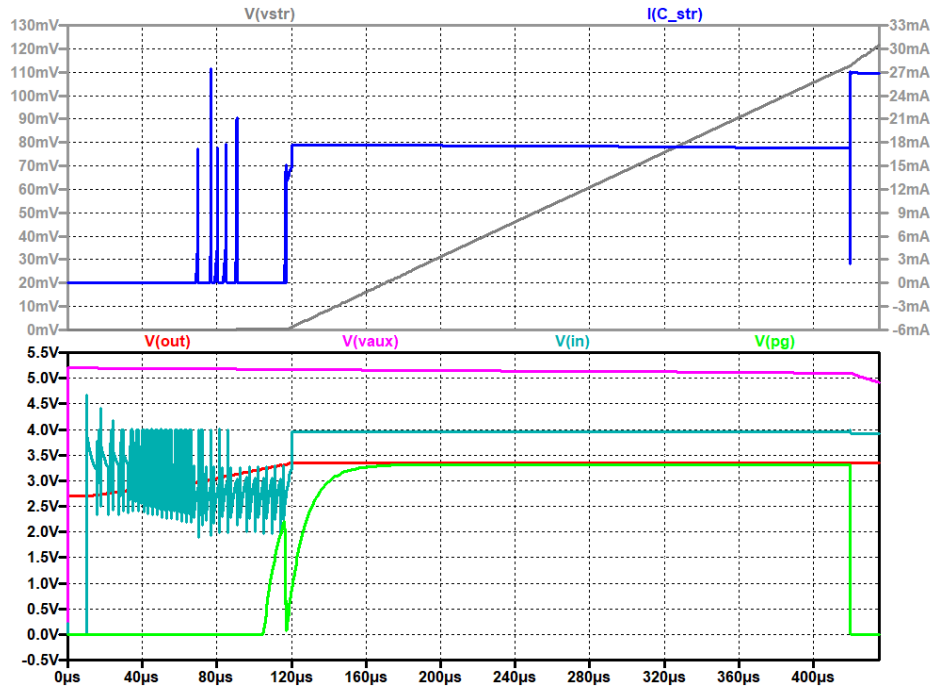


Figura 94. Curvas de tensiones y corrientes durante la carga de Vstore de la simulación del LTC3106

La corriente de carga de la fuente de respaldo tiene picos de corriente durante la fase final de la carga de salida. Cuando $V_{out}=3.3V$ se activa P_{GOOD} . Cuando P_{GOOD} deja de estar a nivel alto, V_{STORE} comienza a cargarse con una corriente de 27mA.

6.2.2 Simulación del LTC3108

El esquema que se va a simular para analizar su funcionamiento es el de la Figura 95.

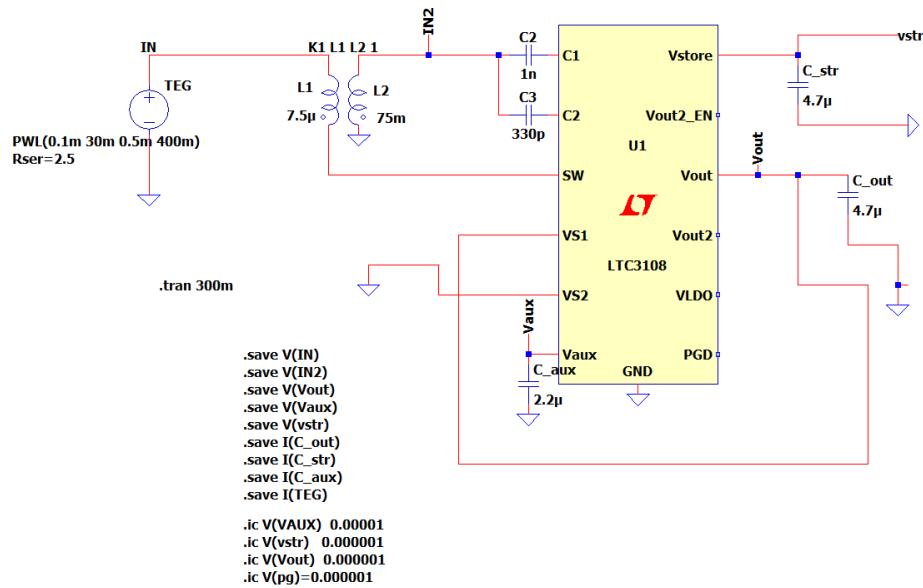


Figura 95. Esquema de la simulación del LTC3108

La tensión de entrada se ha parametrizado para que comience con 35mV y posteriormente aumente hasta los 400mV. También se le aplica una resistencia interna de 2.50 Ω . Hay que tener en cuenta que, si ha disminuido la tensión de salida de la celda, puede ser porque ha aumentado la temperatura de la cara fría o a disminuido la temperatura de la cara caliente, lo que supone que disminuye su resistencia interna.

Resultados de la simulación:

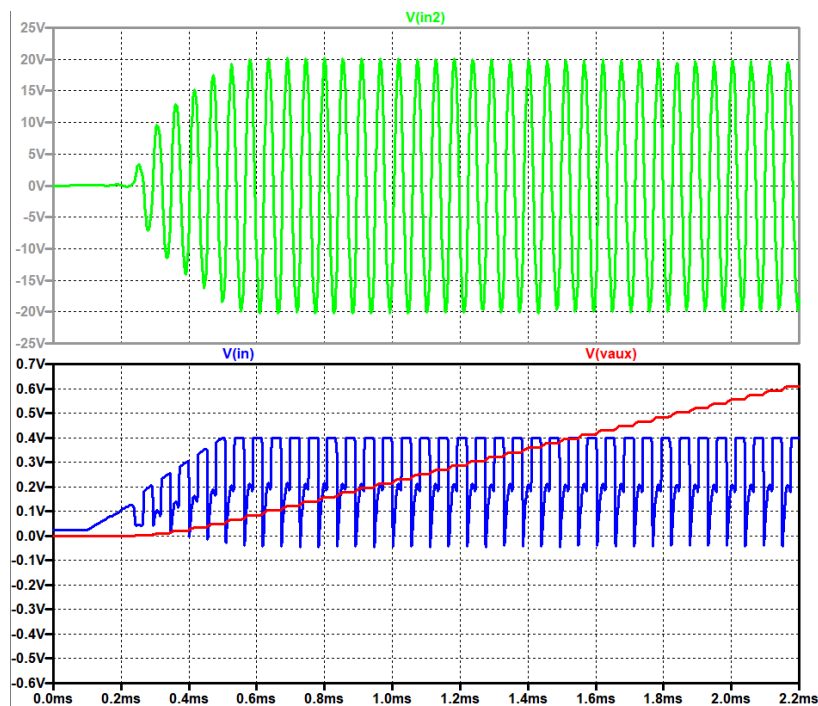


Figura 96. Curvas de tensiones y corrientes en el arranque de la simulación del LTC3108

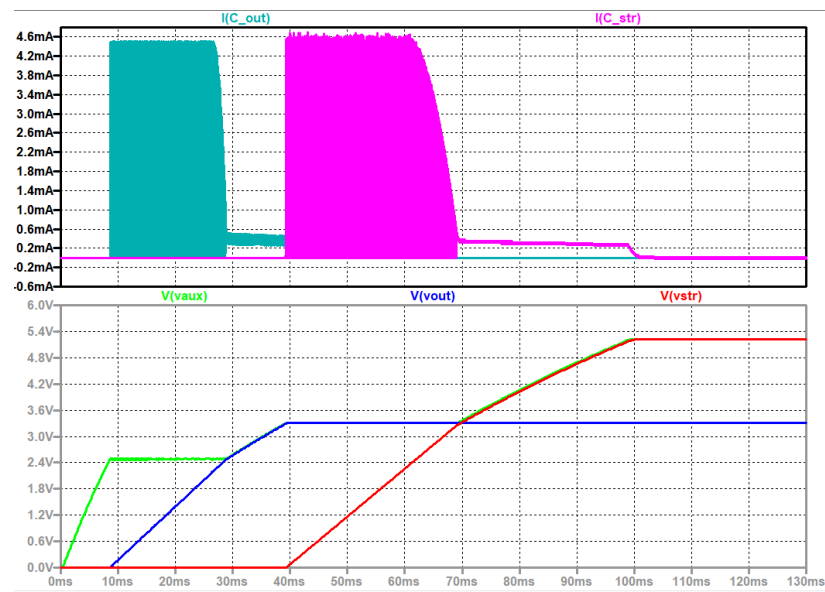


Figura 97. Curvas de tensiones y corrientes durante la carga de V_{store} de la simulación del LTC3106

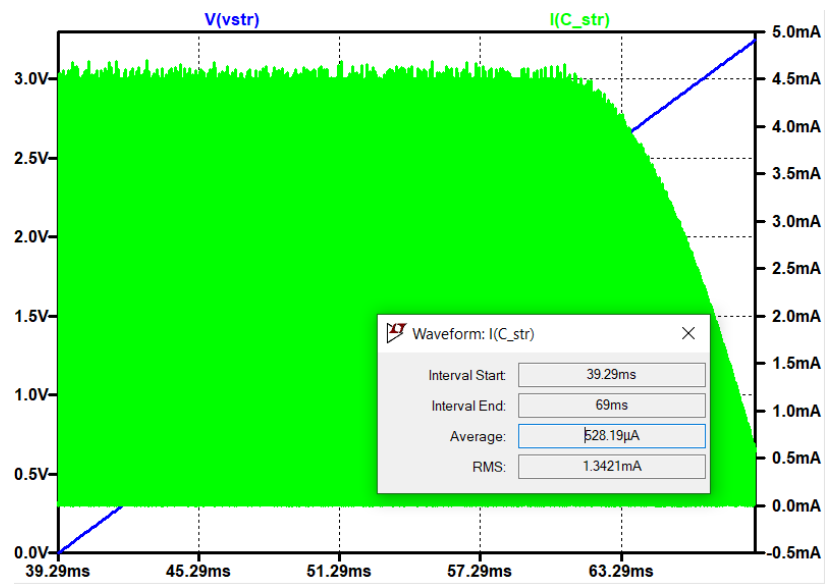


Figura 98. Variación de la corriente de carga de V_{store} del LTC3108

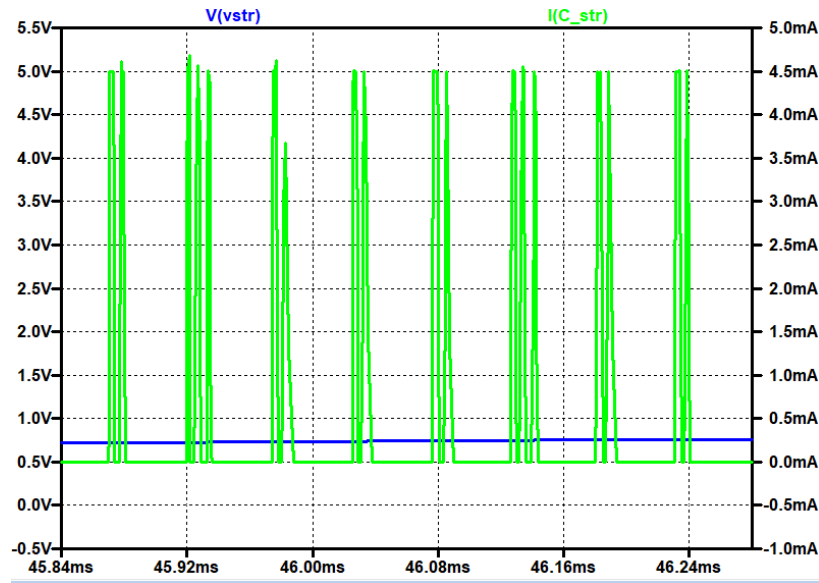


Figura 99. Curva ampliada de la variación de la corriente de carga de Vstore del LTC3108 en el primer tramo

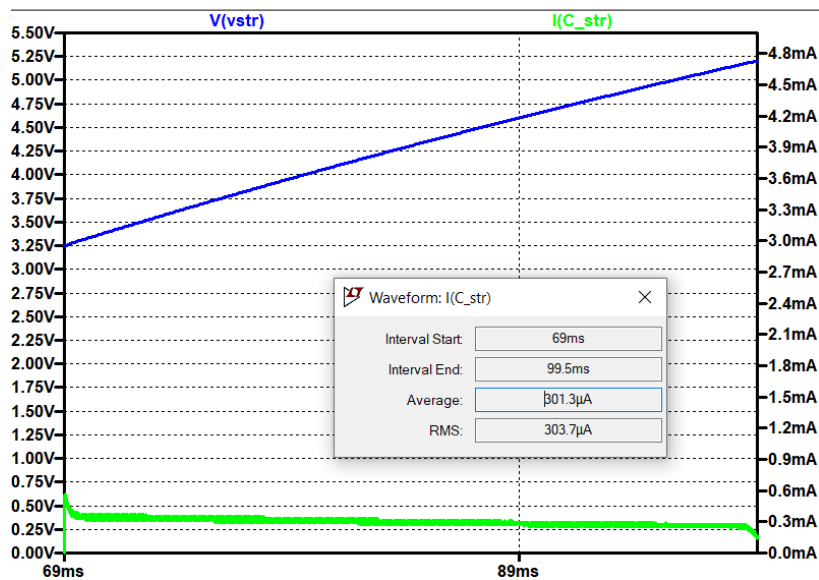


Figura 100. Curva ampliada de la variación de la corriente de carga de Vstore del LTC3108 en el segundo tramo

Los resultados muestran que a partir de 5V a la salida del transformador comienza a cargarse V_{AUX} . Por lo tanto, con la configuración aplicada, es necesario disponer de 50mV en la salida de la celda peltier para que comience a activarse el LTC3108.

A los 200ms de simulación, V_{IN} cambia su valor a 120ms y se aprecia claramente como aumenta la tensión V_{AUX} .

La corriente de carga de V_{STORE} es una señal de pulsos asimétrica que alcanza 4.5mA de amplitud máxima y valor eficaz 1.3421mA hasta que iguala el nivel de tensión de V_{OUT} (3.3V en este caso). A partir de este nivel de tensión, la corriente de carga disminuye y su valor eficaz es de 0.3037mA.

6.3 Tiempo de carga

Para simular la carga de los supercondensadores seleccionados utilizamos el bloque *Supercapacitor* disponible en MATLAB/Simulink.

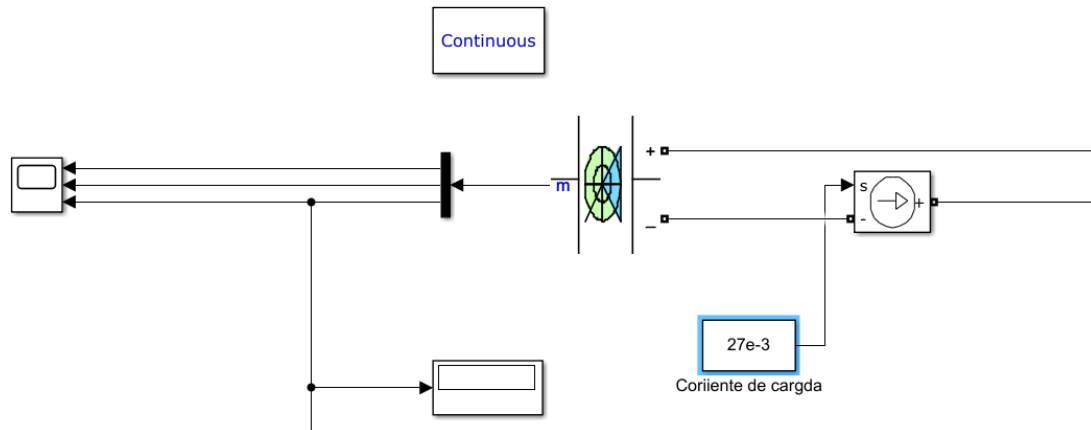


Figura 101. Esquema de la simulación del supercondensador en Simulink

Este bloque tiene como parámetro la capacitancia, la resistencia en serie, voltaje nominal, número de supercondensadores en serie y paralelo, el voltaje inicial y la temperatura. Además, se puede configurar la descarga por corrientes de fuga.

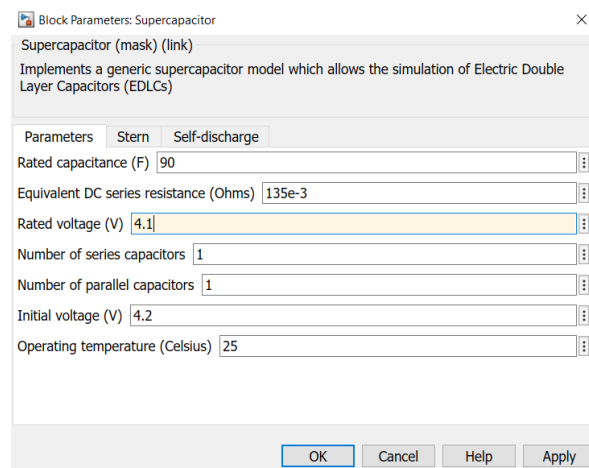


Figura 102. Bloque Supercapacitor de Simulink

6.3.1 Fuente de respaldo principal

El supercondensador elegido para almacenar la energía sobrante del LTC3106 es del fabricante [Vishay](#).



Figura 103. Supercondensador de 90F 4.2V de Vishay

Sus características principales son:

- Capacitancia=90F
- Voltaje nominal=4.2V
- ESR=135mΩ
- Corriente de fuga=500μA

El voltaje máximo de operación de la fuente de respaldo en el LTC3106 es de 4.1V y su mínimo 2.1V (SS1=SS2=0V).

Tabla 9. Rango de valores del LTC3106

V_{STORE} Minimum Operating Voltage	V_{OUT} in Regulation, V_{CAP} Shorted to V_{STORE} , $PRI = V_{CC}$, $ENVSTR = V_{STORE}$		2.1		V
V_{STORE} Under Voltage Lockout	$PRI = V_{CC}$, $ENVSTR = V_{STORE}$		● 1.730	1.778	1.826
V_{STORE} Operating Voltage (Note 7)	SS1 = 0V, SS2 = 0V	0V UV	● 3.90	4.00	4.10
			● 2.70	2.78	2.86
	SS1 = 0V, SS2 = V_{CC}	0V UV	● 2.81	2.90	2.99
			● 1.85	1.90	1.95
	SS1 = V_{CC} , SS2 = 0V	0V UV	● 2.91	3.00	3.08
			● 2.08	2.15	2.21
	SS1 = V_{CC} , SS2 = V_{CC}	0V UV	● 3.90	4.00	4.10
			● 2.91	3.00	3.08

La corriente de carga que se aplicará en la simulación es de 27mA, obtenida en la simulación del LTC3106. En el caso de que se recargue mediante el LTC3108, se ha visto en su simulación no es una señal constante sino una señal de pulsos asimétrica cuyo valor eficaz es 1.3421mA hasta $V_{STORE} = 3.3V$ y de 0.3037mA para alcanzar $V_{STORE} = 5.2V$.

Resultados de la simulación:

Una vez introducidos los parámetros del supercondensador y los valores de corriente de carga en el esquema de Simulink se ha programado la simulación para que se pare cuando el nivel de tensión alcanzado sea 4.1V (al 92.05% de su máximo), para el caso de que la recarga la realice el LTC3106, y en 3.3V para el LTC3108

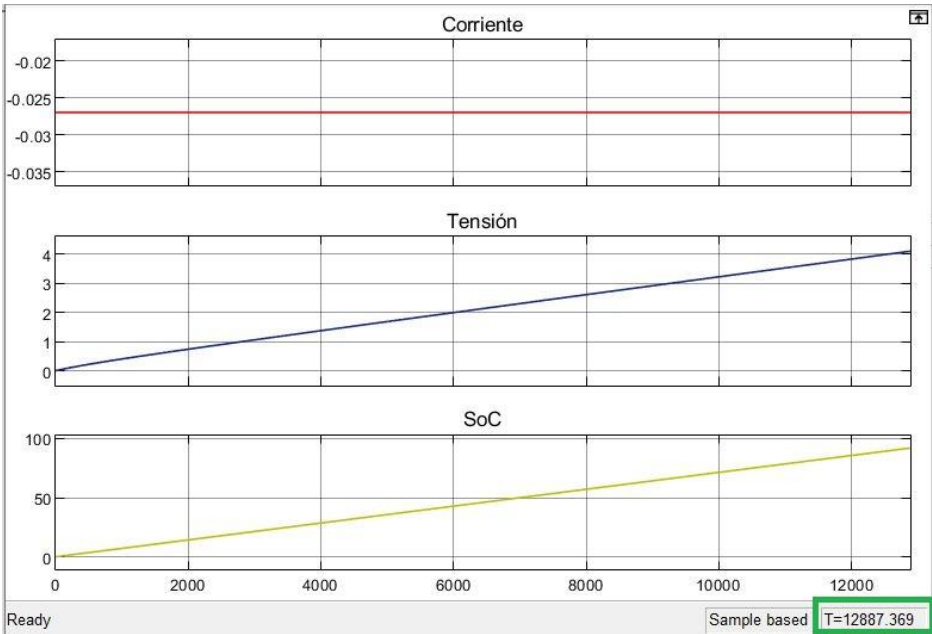


Figura 104. Simulación de la recarga de la fuente de respaldo principal por LTC3106

Aplicando 27mA, el tiempo transcurrido es de 12887 segundos, es decir, 3,56h.

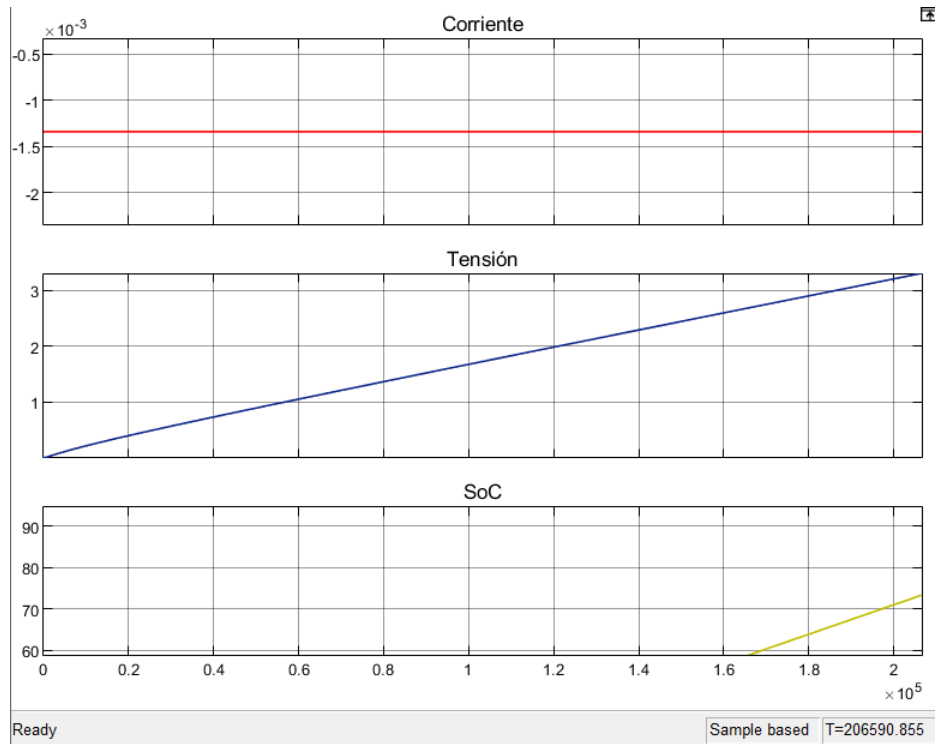


Figura 105. Simulación de la recarga de la fuente de respaldo principal por LTC3108

Si quisiéramos recargar este supercondensador con la corriente de salida del LTC3108 tardaría 57.386 horas (206590 segundos), más de dos días hasta alcanzar 3.3V. No sería viable, excepto si la aplicación tenga un funcionamiento esporádico, como puede ser la recogida de datos de un sensor ambiental que mida la contaminación atmosférica.

6.3.2 Fuente de respaldo secundaria

Como fuente de respaldo del LTC3108 utilizamos un supercondensador de 1F voltaje nominal 5.4V y resistencia interna 150mOhms el fabricante [AVX Corporation](https://www.avx.com/).



Figura 106. Supercondensador de 1F y 5.4V de AVX Corporation

Resultados de la simulación:

En este caso aplicamos una corriente de carga de 1.3421 mA hasta que alcance 3.3V y a continuación 0.31mA para el tramo de 3.3V a 5.2V

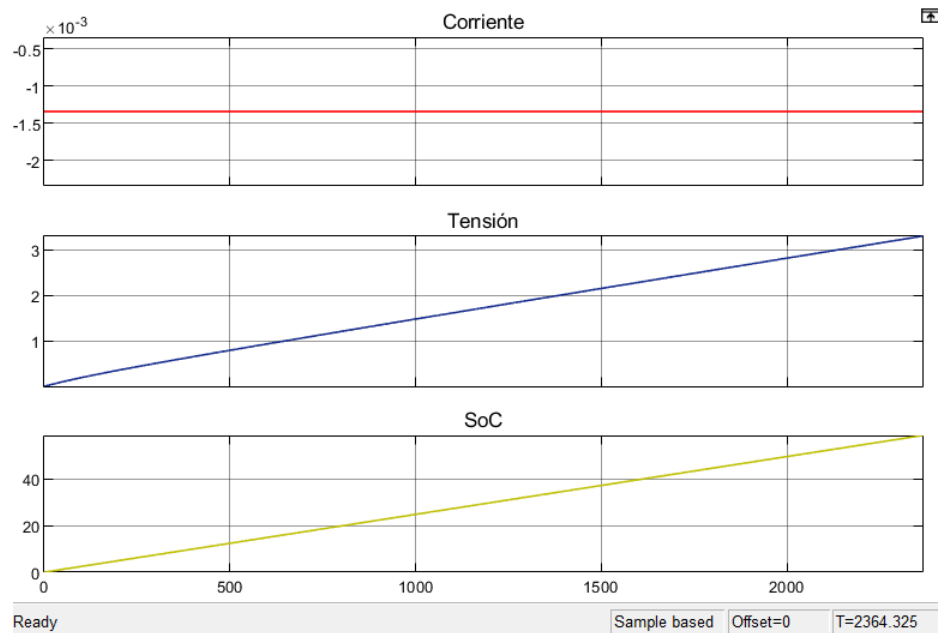


Figura 107. Simulación del tiempo de carga de la fuente de respaldo secundaria por 3108 hasta 3.3V

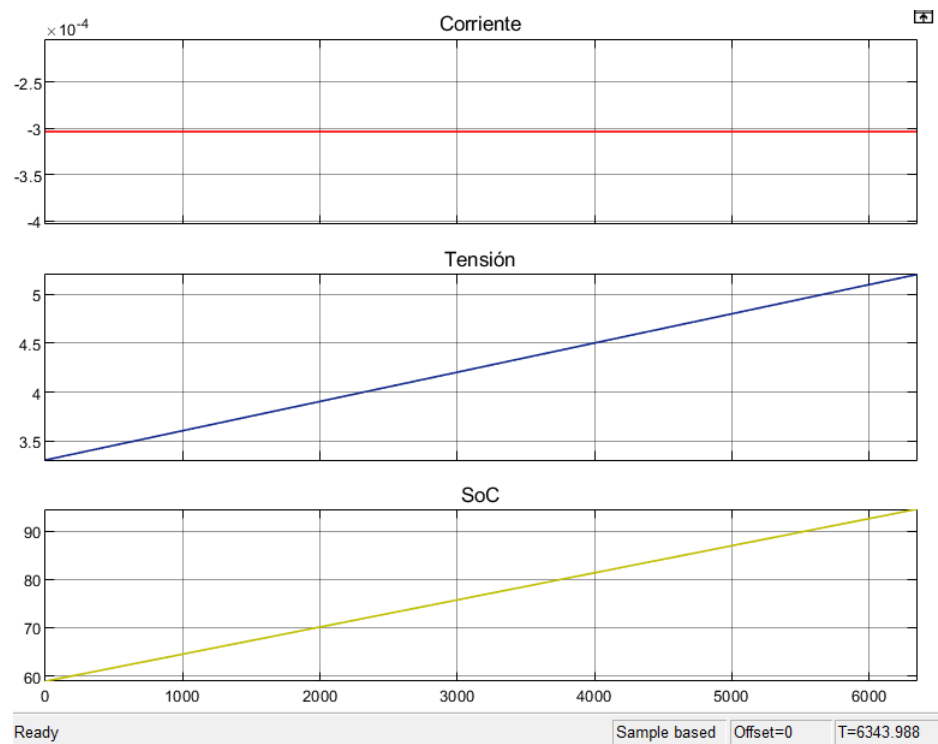


Figura 108. Simulación del tiempo de carga de la fuente de respaldo secundaria por 3108 de 3.3V hasta 5.2V

Este supercondensador, con una corriente con valor eficaz de 1.3421 mA, tarda en alcanzar 3.3V (58.90% de la tensión máxima del supercondensador), 2364 segundos (39.40 minutos).

Para completar el voltaje máximo posible del pin V_{STORE} (5.2V, 94.57% del total del supercondensador, se necesitan 6344 segundos (1 hora 46 minutos).

Por lo tanto, la fuente de respaldo conectada al LTC3108 tardaría 2 horas y 25 minutos en completar su carga con la configuración aplicada.

El tiempo transcurrido entre 3.3V y 5.2V puede variar en función de la tensión de entrada, la carga o el condensador conectado a V_{AUX} .

6.3.3 Dispositivos móviles

Si quisiéramos cargar la batería de dispositivos que utilizamos a diario, como puede ser una pulsera de actividad o un libro electrónico, la mayoría de ellos utilizan cables USB. La tensión de un cable USB es de 5V, por lo tanto, la tensión de entrada del LTC3106 debe ser mayor a 1V y en algunos casos a 2.5V para generar una corriente de salida suficiente para que el tiempo de carga no sea muy duradero.

Según los resultados obtenidos en la simulación de los dispositivos seleccionados, con la configuración más eficiente (dos celdas peltier compartiendo disipador de calor) se podría obtener esos niveles de tensión en un rango de temperaturas fácil de encontrar, de 50 a 100°C (Visualice **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por ejemplo, empleando una vela como fuente de calor, la temperatura en la superficie de la celda, a una cierta distancia segura, es de 85 a 100°C o en el interior de un coche donde las celdas podrían absorber calor desprendido por el radiador o el motor, la intensidad del calor en algunas zonas del interior de un vehículo puede hasta sobrepasar la temperatura máxima que puede soportar la celda.

La potencia de salida generada sería suficiente para soportar las pérdidas que se producen en el LTC3106 (máximo 200 mW). Otro dato importante es que, si las celdas peltier no consiguen generar más de 1V, se desprejará más energía, ya que el LTC3106 reduce considerablemente su eficiencia para tensiones de entrada pequeñas (Visualice **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

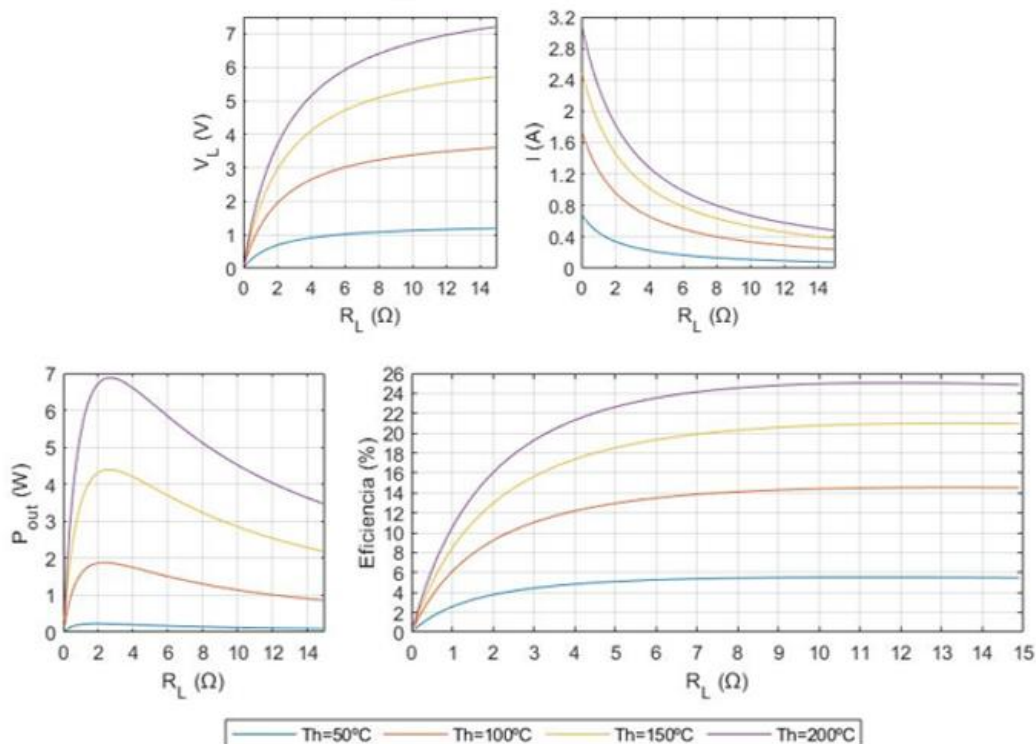


Figura 109. Rendimiento de las celdas peltier con la configuración más eficiente

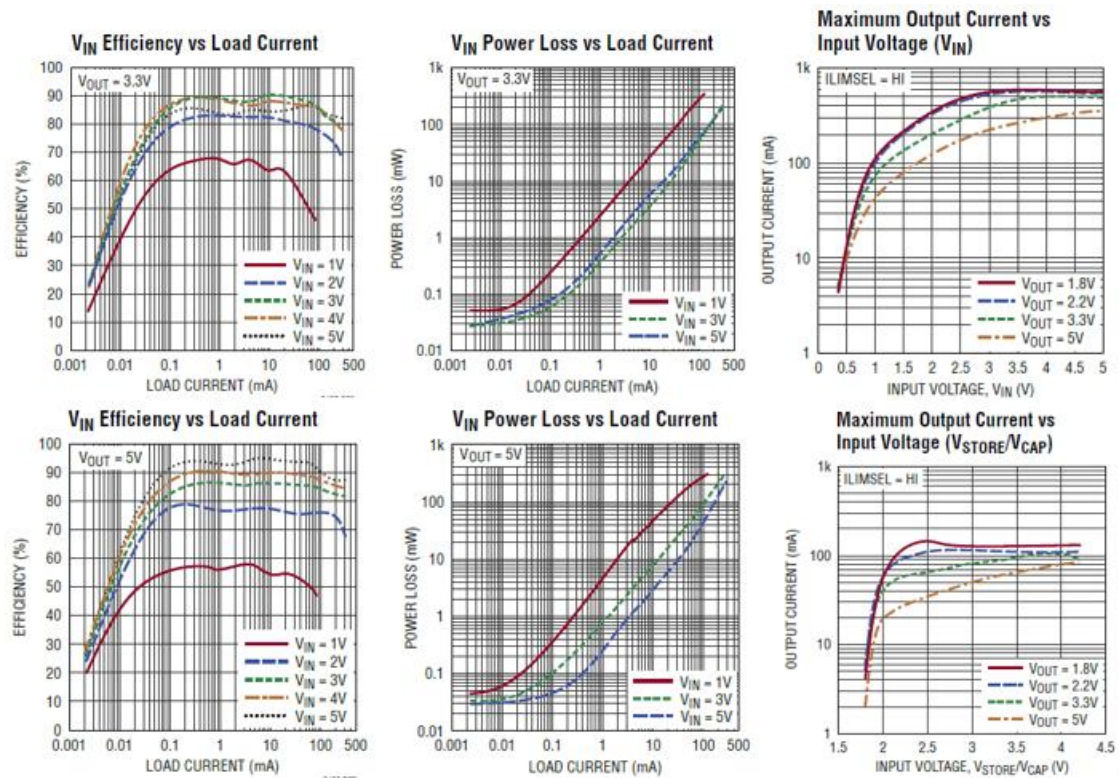


Figura 110. Representaciones de las características típicas del LTC3106.

En caso de que la tensión de entrada no estuviera disponible, la corriente de salida es menor si se utiliza la fuente de respaldo. Además, los supercondensadores que se han seleccionado no serían capaces de almacenar la suficiente energía como para cargar al completo las baterías de estos dispositivos. Con el LTC3108 es inviable en este caso.

En las siguientes tablas se muestra el tiempo que sería necesario para cargar algunos dispositivos si utilizáramos el diseño propuesto y suponiendo que no se sufren pérdidas durante el proceso de carga.

Tabla 10. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con $I_{OUT}=80mA$

Parámetros LTC3106: $V_{IN}=1V$, $V_{OUT}=5V$, $I_{OUT}=80mA$		
Dispositivo	Batería	Tiempo para carga completa
Pulsera de actividad Xiaomi Mi Band 4	135 mAh	1 hora 42 minutos
Smartwatch Amazfit GTR 42mm	195mAh	2 hora 27 minutos
Auriculares Bluetooth QCY T5 (caja de carga)	380mAh	4 horas 45 minutos
Teléfono básico Alcatel 10.66	400mAh	5 horas
Libro electrónico PocketBook Basic Lux 2	1300mAh	16 horas 15 minutos
Smartphone Xiaomi Redmi Note 7	4000mAh	50 horas

Tabla 11. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con $I_{out}=190mA$

Parámetros LTC3106: $V_{IN}=2.5V$, $V_{OUT}=5V$, $I_{OUT}=190mA$		
Dispositivo	Batería	Tiempo para carga completa
<i>Pulsera de actividad Xiaomi Mi Band 4</i>	135 mAh	43 minutos
<i>Smartwatch Amazfit GTR 42mm</i>	195mAh	1 hora 2 minutos
<i>Auriculares Bluetooth QCY T5 (caja de carga)</i>	380mAh	2 horas
<i>Teléfono básico Alcatel 10.66</i>	400mAh	2 horas 7 minutos
<i>Libro electrónico PocketBook Basic Lux 2</i>	1300mAh	6 horas 50 minutos
<i>Smartphone Xiaomi Redmi Note 7</i>	4000mAh	21 horas 3 minutos

Tabla 12. Tiempos de carga de dispositivos electrónicos con $I_{out}=280mA$

Parámetros LTC3106: $V_{IN}=3.5V$, $V_{OUT}=5V$, $I_{OUT}=280mA$		
Dispositivo	Batería	Tiempo para carga completa
<i>Pulsera de actividad Xiaomi Mi Band 4</i>	135 mAh	29 minutos
<i>Smartwach Amazfit GTR 42mm</i>	195mAh	42 minutos
<i>Auriculares Bluetooth QCY T5 (caja de carga)</i>	380mAh	1 hora 22 minutos
<i>Teléfono básico Alcatel 10.66</i>	400mAh	1 horas 43 minutos
<i>Libro electrónico PocketBook Basic Lux 2</i>	1300mAh	5 horas 34 minutos
<i>Smartphone Xiaomi Redmi Note 7</i>	4000mAh	17 horas 8 minutos

Capítulo 7

7 Conclusiones

El estudio y análisis desarrollado en este trabajo de fin de grado demuestran que con las prestaciones que ofrecen una celda peltier en la actualidad su aplicación más interesante es como fuente de alimentación de sistemas electrónicos portátiles de bajo consumo, sustituyendo así a baterías que resultan un problema para el medio ambiente.

Su baja eficiencia energética y la falta de dispositivos más económicos, en comparación con otras tecnologías de sistemas recolectores, se deben a:

- Necesidad de conseguir materiales con mayor ZT.
- Es difícil hacer coincidir la temperatura de la fuente de calor con la temperatura a la cual el modelo de celda peltier es más eficiente.
- Gran dependencia del tipo de disipador de calor empleado y de la carga conectada.
- Algunos módulos tienen una alta resistencia eléctrica interna.
- No todos los fabricantes proporcionan la información necesaria para la realización de una simulación precisa, por lo que es necesario la toma de medidas reales.
- Los niveles de tensión obtenidos por una celda peltier son muy bajos. Además, esto reduce la oferta de convertidores.
- Dificultad para recargar almacenadores de energía. Las corrientes de carga de los reguladores de tensión orientados a dispositivos recolectores como las celdas son muy pequeñas y, en consecuencia, los tiempos de carga son de larga duración (en función del supercondensador empleado).

Si se desea aumentar la energía generada para poder alimentar dispositivos más potentes, se ha demostrado que las conexiones en serie de dos o más celdas reducen considerablemente la eficiencia energética en comparación con las conexiones en paralelo o mixtas simétricas.

Según los resultados obtenidos de la simulación con los dispositivos seleccionados, la configuración más efectiva se consigue empleando dos celdas conectadas en paralelo y compartiendo disipador de calor.

Para dispositivos no muy potentes que utilizamos a diario, las celdas peltier puede ser una alternativa interesante. A pesar de que otros tipos de sistemas *energy harvesting* como los paneles solares son actualmente una opción más económica, las celdas peltier tiene la ventaja de que se puede obtener electricidad en cualquier sitio y a cualquier hora.

En un futuro en el cual se consigan desarrollar dispositivos fabricados con materiales termoelectricos con mayor ZT aumentará el número de aplicaciones de las celdas peltier como generadores termoelectricos, ya que la presencia de gradientes térmicos está en muchos entornos y su utilización es una gran aportación a la generación de energía eléctrica renovable.

Pliego de Condiciones

Para obtener una evaluación del comportamiento de un sistema termoeléctrico mediante la simulación desarrollada en necesario los siguientes recursos:

Recursos Hardware:

- Ordenador de sobremesa/portátil

Recursos Software:

- Windows 10 Home
- Paquete Office Microsoft 365
- Matlab/ Simulink/ Simscape
- LTSpice

Presupuesto

Presupuesto para el análisis y diseño del sistema termoelectrico

El presupuesto necesario para realización del estudio de un sistema termoelectrico es:

Tabla 13. Presupuesto para los recursos hardware utilizados para la realización del TFG

Recursos hardware	
Ordenador portátil Xiaomi Mi Notebook Pro i5 8th	970€
Total	970€

Tabla 14. Presupuesto para los recursos software utilizados para la realización del TFG

Recursos software	
Windows 10 Home	145€
Microsoft 365 personal	69€ (un año)
Matlab	2000€
Simulink	3000€
Simscape	2000€
LTSpice	Gratuito
Total	7214€

Tabla 15. Tiempo empleado a la realización del TFG

Ocupación temporal	
Búsqueda de información	2 meses (200h)
Análisis y diseño del sistema	1.5 mes (150h)
Desarrollo de las simulaciones	2.5 meses (250h)
Redacción de la memoria	2 meses (200h)
Duración total empleada	800 horas
Salario del empleado	15 €/h
Total	12000€

Tabla 16. Presupuesto total para el análisis y diseño de un sistema termoelectrico

Presupuesto total	20184€
--------------------------	---------------

Los precios aplicados de los recursos utilizados son los ofrecidos actualmente por las corporaciones propietarias.

La ocupación temporal corresponde al tiempo aproximado que ha sido necesario para la realización del proyecto (25 horas por semana).

Se ha escogido el salario medio que recibiría un ingeniero electrónico en la actualidad.

Presupuesto para implementar el diseño propuesto

Si quisiéramos implementar el sistema *energy harvesting* con la configuración más eficiente de los dispositivos seleccionados (dos celdas peltier en paralelo con un solo disipador), el presupuesto necesario sería:

Tabla 17. Presupuesto para la celda peltier y disipador seleccionados en la simulación

Dispositivos seleccionados para la simulación	
Celda peltier GM200-127-14-16 (2ud.)	72.16€
Disipador Wakefield-Vette 511-3M (1ud.)	37,59€
Total	109.75€

Tabla 18. Presupuesto para los componentes principales del diseño de regulación de tensión propuesto

Componentes principales necesarios para el diseño de regulación de tensión propuesto	
LTC3108	5.76€
LTC3106	5.84€
Supercap 90F 4.2V	11.82€
Supercap 1F 5.4V	3.68€
Transformador elevador (LPR6235-752SML)	2.76€
Total	29.86€

Tabla 19. Presupuesto total para implementar el diseño propuesto

Presupuesto total	139.61€
--------------------------	----------------

Los precios de los componentes han sido obtenidos de los portales web en los cuáles se pueden comprar. Incluyen IVA y no se le ha aplicado gastos de envío.

Del diseño propuesto para regular la salida de la celda peltier se han tenido en cuenta únicamente los elementos principales, obviando otros componentes como resistencias, inductancias, condensadores o placa de montaje.

Los costes por mano de obra y equipos de medición de laboratorio no se han incluido ya que no se puede estimar el tiempo necesario para el montaje del circuito, la obtención de medidas y el análisis de los resultados obtenidos.

Bibliografía

- [1] R. Williams, *Energy Harvesting, technology, methods and applications*. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, 2015.
- [2] H.J. Goldsmid, *Theory of Thermoelectric Refrigeration and Generation*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010.
- [3] D.M. Rowe, *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*. CRC Press, 2006.
- [4] M. Di Paolo Emilio, *Microelectronic Circuit Design for Energy Harvesting Systems*. Springer; 2017.
- [5] D. Enescu, *Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications. Green energy advances*. Books on Demand, 2019.
- [6] D. Daniel Champier. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*. Volume 140, 2017, Pages 167-181.
- [7] D.M. Rowe, *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics*. CRC Press, 2012.
- [8] D.M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, CRC Press, 1995. cap 38.
- [9] Diapositivas de la asignatura Tecnología Electrónica, Departamento: Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá. 2018.
- [10] S. Nie, M.Wang, X. Gao, J. Liao. *Extraction of Temperature-Dependent Thermoelectric Material Parameters of a Thermoelectric Cooler by the Non-Linear Least Squares Method*. *Energies*. 2019; 12(1):169.
- [11] J. F. Shackelford, Y-H. Han, S. Kim, S-H. Kwon. *CRC Materials Science and Engineering Handbook*. CRC Press, 2015.
- [12] H. Lee. *Thermoelectrics: Design and Materials*. John Wiley & Sons, 2017.
- [13] H. Lee. *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] F.P. Incropera, D.P. DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, 1999.
- [15] Diapositivas de la asignatura Electrónica de Potencia, Departamento: Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá. 2018.
- [16] J. Ureña Ureña, M. Sotelo Vázquez, F. Rodríguez Sánchez, R. Barea Navarro, M. Domínguez Herranz, E. Bueno Peña y P. Revenga de Toro, *Electrónica de Potencia*, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá, 1999.
- [17] W. Li, M.C. Paul, A. Montecucco, J. Siviter, A.R. Knox, T. Sweet, M. Gao, H. Baig, T.K. Mallick, G. Han, D.H. Gregory, F. Azough, R. Freer. *Multiphysics simulations of thermoelectric generator modules with cold and hot blocks and effects of some factors*. *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 10, 2017, Pages 63-72.
- [18] A. Emadi, A. Khaligh, Z. Nie, Y. J. Lee. *Integrated Power Electronic Converters and Digital Control*. CRC Press, 2009.

- [19] Y. Y. Yao, D. L. Zhang and D. G. Xu, "A Study of Supercapacitor Parameters and Characteristics", 2006 International Conference on Power System Technology, 2006, pp. 1-4.

Referencias Web

<https://es.mathworks.com/products/simscape.html>

https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html?s_tid=srchtitle

Anexos

18/05/21 13:35 C:\...\parametros inicializacion TEG.m 1 of 2

```
%%%%%%%% CELDA PELTIER %%%%%%%%%%

% Temperatura inicial de las caras
T=Th; %Temperatura superficie caliente
T_ambiente=273.15+25; %Temperatura ambiente (K)

% Dimensiones de la celda
n_tc=127; %Número de termopares de la celda

A_device=(4e-2)^2; %Área de la celda peltier (m2)
H_device=3.8e-3; %Espesor de la celda peltier (m)

A_tc=8.04817411811288e-06; %Área del termopar
H_tc= 3.4e-3; %Espesor de los termopares

H_bas= H_device-H_tc; %Espesor de las dos bases cerámicas

%% PROPIEDADES TERMOELECTRICAS DE LA CELDA PETIER

% Coeficientes seebeck Bi2Te3
S_type_n= (0.001530736 )*(T^2) +(-1.08058874 )*T + (-28.338095 );
S_type_p= (-0.003638095 )*(T^2) +(2.74380952 )*T + (-296.214286 );

% Conductividad thermal Bi2Te3
k_type_n= (0.0000334545)*(T^2) +(-0.023350303)*T + (5.606333);
k_type_p= (0.0000361558)*(T^2) +(-0.026351342)*T + (6.22162);

% Conductividad electrica Bi2Te3
sigma_type_p= ((0.015601732 )*(T^2) +(-15.708052 )*T + (4466.38095 ))*10^2;
sigma_type_n= ((0.01057143 )*(T^2) +(-10.16048 )*T + (3113.71429 ))*10^2;

% Propiedades termoeletricas de los termopares
S=(S_type_p - S_type_n)*10^(-6); %Coef. Seebeck termopar(V/K)
k=(k_type_p + k_type_n); %Conductividad térmica (W/m/K)
sigma=(sigma_type_p + sigma_type_n); %Conductividad eléctrica (1/(Ohm*m))
p_n=1/sigma_type_n; %Resistividad electr. tipo n(Ohm*m)
p_p=1/sigma_type_p; %Resistividad electr. tipo p(Ohm*m)
p=p_p+p_n; %Resistividad electr. total (Ohm*m)
C_tem=k*A_tc/H_tc; %Conductancia termopares (W/K)

% Propiedades termoelectricas bases cerámicas, Al2O3, alumina
k_bas=31;
C_bas=k_bas*A_device/H_bas;

% Propiedades termoelectricas del módulo
S_device= S*n_tc; %Coef. Seebeck total
Re= 2*n_tc*H_tc/A_tc*(1/sigma_type_p + 1/sigma_type_n); %Resistencia eléctrica total
C_device=(1/C_tem+1/C_bas)^(-1); %Conductancia térmica total (despreciando el cobre)
```

```
% Calor específico de la base cerámica
Vol_bas=A_device*(H_bas/2);           %Volumen de la base cerámica
densidad_bas=3220;                     %Densidad de la base cerámica
m_bas = densidad_bas*Vol_bas;          %Masa de la base cerámica
c_bas= 419;                            %Calor de la base cerámica
```



```

%% Simulación en función de la carga con disipador comercial seleccionado
% 5 esquemas de simulación. La configuración de los plot se debe ajustar
% a cada simulación (xticks,yticks,ylim, xlim)

clear all;close all; %Limpia variables anteriores y cierra figuras previas

% Rth_heatsink = 5.60; %Disipador 1(°C/W)
Rth_heatsink = 0.90; %Disipador2 para "simPeltier_paralelo_1_heatsink"

Th_vec =(30 : 10: 200); %Vector valores fuente térmica para Voc.
Th_vec_oc=Th_vec;

for i= 1:length(Th_vec)

    Th=Th_vec(i)+273.15;
    parametros_inicializacion_TEG; %Cálculo parametros celda para cada valor de Th
    Th
    RL=9999999; %Circuito abierto

    %Selección del esquema a simular

    %sim("simPeltier_RL"); %Simulación 1 celda
    %sim("simPeltier_serie"); %Simulacion 2 celdas en serie
    %sim("simPeltier_paralelo "); %Simulacion 2 celdas en paralelo
    %sim("simPeltier_mixta_tipol"); %Simulacion 2x2 paralelo
    sim("simPeltier_paralelo_1_heatsink"); %Simulacion 2 paralelo 1 disipador

    Voc_vec(i)= ans.Vout(end);

end

Th_vec =(50 : 50: 200); %Valores fuente térmica resto de gráficas.50-200
RL_vec= (0.05 : 0.15: 15); %Valores de la carga. De 0.05ohm a 15ohm

for i= 1:length(Th_vec)

    Th=Th_vec(i)+273.15; %Temperatura en grados Kelvin

    parametros_inicializacion_TEG; %Cálculo parametros celda
    for j=1:length (RL_vec)
        RL=RL_vec(j);

    %Selección del esquema a simular

    %sim("simPeltier_RL"); %Simulación 1 celda
    %sim("simPeltier_serie"); %Simulacion 2 celdas en serie
    %sim("simPeltier_paralelo "); %Simulacion 2 celdas en paralelo
    %sim("simPeltier_mixta_tipol"); %Simulacion 2x2 paralelo
    sim("simPeltier_paralelo_1_heatsink"); %Simulacion 2 paralelo 1 disipador

    V_vec(j,i)= ans.Vout(end);

```

```
I_vec(j,i)= ans.Iout(end);
T_cold_vec(j,i)= ans.T_cold(end);
Dif_Temp (j,i)= Th-(ans.T_cold(end)+273.15);
W_vec(j,i)= ans.W(end);
Qh_vec(j,i)=ans.Qh(end);
Qc_vec(j,i)=ans.Qc(end);
E_vec(j,i)= 100*ans.W(end)/ans.Qh(end);
end

end

figure(1);

tiledlayout(3,3)
nexttile;
plot(Th_vec_oc,Voc_vec);
xlabel('T_h (°C)');
ylabel('V_o_c (V)');
xlim([0 220]);
xticks(0 : 50: 200);
yticks(0 : 1: 17);
ylim([0 9]);
grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,V_vec);
xlabel('R_L (Ω)');
ylabel('V_L (V)');
xlim([0 15]);
yticks(0 : 1: 11);
xticks(0 : 2: 15);
xlim([0 15]);
ylim([0 7.5]);
grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,I_vec);
xlabel('R_L (Ω)');
ylabel('I (A)');
ylim([0 3.2]);
xlim([0 15]);
yticks(0 : 0.4: 3.2);
xticks(0 : 2: 15);
grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,T_cold_vec);
xlabel('R_L (Ω)');
ylabel('T_c (°C)');
xlim([0 15]);
ylim([25 85]);
xticks(0 : 2: 15);
yticks(25 : 10: 200);
```

```

grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,Qh_vec);
xlabel('R_L ( $\Omega$ )');
ylabel('Q_h total (W)');
xlim([0 15]);
ylim([0 70]);
yticks(0 : 10: 100);
xticks(0 : 2: 15);
grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,Qc_vec);
xlabel('R_L ( $\Omega$ )');
ylabel('Q_c total (W)');
xlim([0 15]);
ylim([0 70]);
yticks(0 : 10: 100);
xticks(0 : 2: 15);
grid on;

nexttile;
plot(Rl_vec,W_vec);
xlabel('R_L ( $\Omega$ )');
ylabel('P_o_u_t (W)');
xlim([0 15]);
yticks(0 : 1: 10);
xticks(0 : 2: 15);
ylim([0 7]);
grid on;

nexttile(8,[1 2]);
plot(Rl_vec,E_vec);
xlabel('R_L ( $\Omega$ )');
ylabel('Eficiencia (%)');
yticks(0 : 2: 30);
xticks(0 : 1: 15);
ylim([0 26]);
xlim([0 15]);
grid on;

lgd = legend(
    'Th=50°C','Th=100°C','Th=150°C','Th=200°C','Location','NorthOutside','Orientation'
    , 'Horizontal');
lgd.Layout.Tile = 'South';

%Selección del título para cada simulación

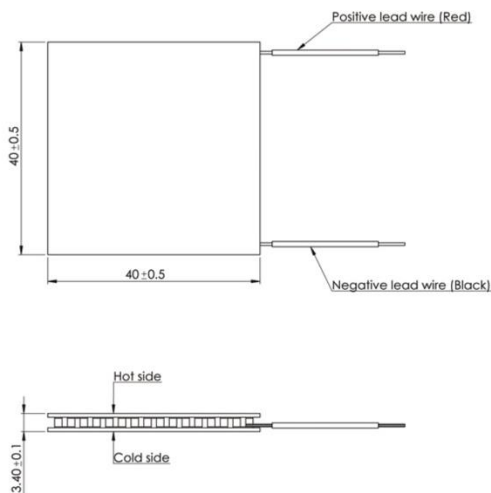
% sgtitle('Simulación de la celda en función de la carga ( R_t_h=5.60 °C/W ;
Temperatura ambiente = 25 °C)');
% sgtitle('Simulación de dos celdas en serie ( R_t_h=5.60 °C/W ; Temperatura
ambiente = 25 °C)');

```

```
% sgttitle('Simulación de dos celdas en paralelo ( R_t_h=5.60 °C/W ; Temperatura ambiente = 25 °C)');  
% sgttitle('Simulación mixta tipo 1 ( R_t_h=5.60 °C/W ; Temperatura ambiente = 25 °C)');  
sgttitle('Dos celdas en paralelo compartiendo disipador ( R_t_h=0.90 °C/W ; Temperatura ambiente = 25 °C)');
```

GM200-127-14-16

Thermoelectric generator module



Parameters for hot side temp 200°C and cold side temp 30°C

Matched load output power	4.73W
Matched load resistance	3.34Ω ± 15%
Open circuit voltage	7.95V
Matched load output	1.19A
Matched load output voltage	3.98V
Heat flow through module	~94.6W
Maximum compress (non-destructive)	1MPa
Maximum operation temperature	Hot side - 200°C. Cold side - 175°C

Features

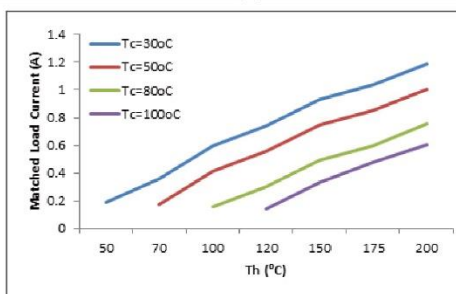
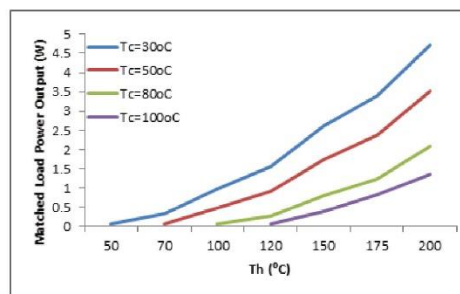
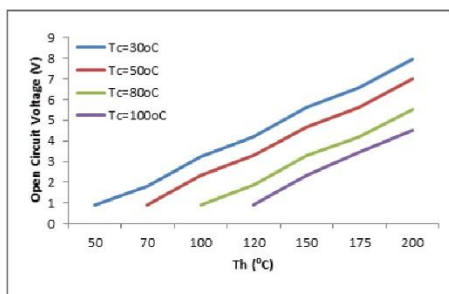
- Compact structure (no moving parts)
- Reliable performance
- Maintenance-free
- Noise-free operation
- Low-carbon, green technology



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-127-14-16

Thermoelectric generator module

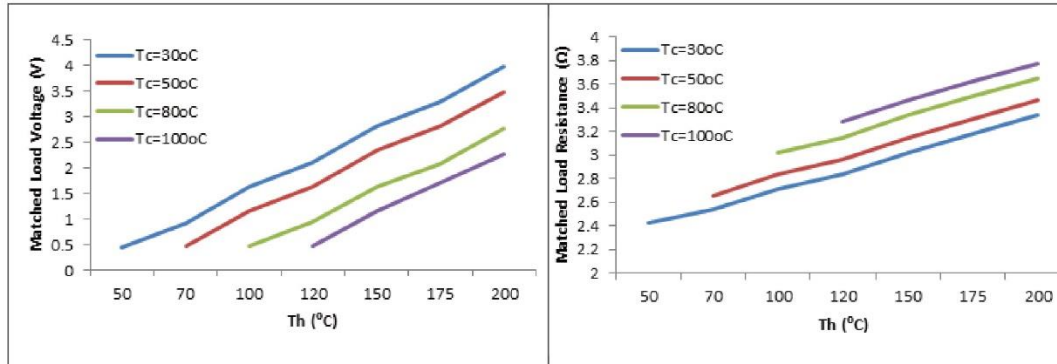


Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-127-14-16 Thermoelectric generator module



Note: Th = hot side temperature



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

GM200-127-14-16 Thermoelectric generator module

Formulae for calculating thermoelectric properties (best fit derived from measured material characteristics)

Thermal conductivity

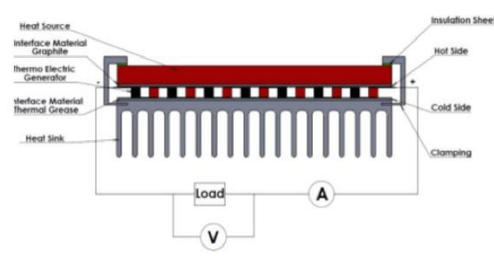
- $k_n = (0.0000334545 \times T^2 - 0.023350303 \times T + 5.606333) \text{ W/mK}$
- $k_p = (0.0000361558 \times T^2 - 0.026351342 \times T + 6.22162) \text{ W/mK}$

Seebeck coefficient

- $\alpha_n = (0.001530736 \times T^2 - 1.08058874 \times T - 28.338095) \times 10^{-6} \text{ V/K}$
- $\alpha_p = (-0.003638095 \times T^2 + 2.74380952 \times T - 296.214286) \times 10^{-6} \text{ V/K}$

Electrical conductivity

- $\sigma_n = (0.015601732 \times T^2 - 15.708052 \times T + 4466.38095) \times 10^2 \text{ S/m}$
- $\sigma_p = (0.01057143 \times T^2 - 10.16048 \times T + 3113.71429) \times 10^2 \text{ S/m}$



Where the subscript n refers to the n-type thermoelement and the subscript p refers to the p-type thermoelement. It should be noted here that the electrical conductivity relates to the electrical resistivity as follows: $\rho = 1/\sigma$. Thus, where electrical resistivity is needed, one can calculate the electrical conductivity through the aforementioned formulae and then reverse to calculate the electrical resistivity.



Adaptive is a registered trademark of European Thermodynamics Limited.
Web: www.etdyn.com Tel: +44(0)116 279 6899 E-mail: info@etdyn.com

LTC3106

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Notes 1, 6)

Supply Voltages

V_{IN} , V_{STORE} , V_{OUT} , V_{CAP} -0.3V to 6V

All Other Pins -0.3V to 6V

Operating Junction Temperature Range

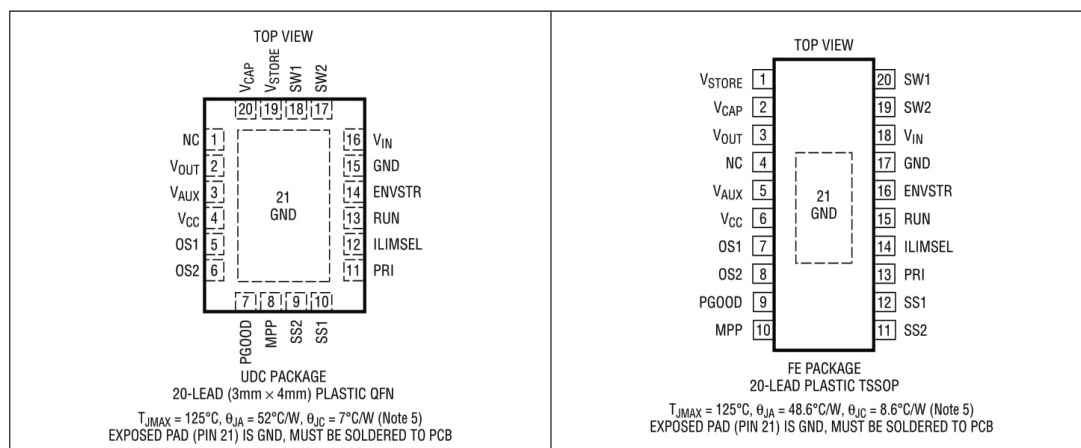
(Notes 2, 3) -40°C to 125°C

Storage Temperature Range -65°C to 150°C

Lead Temperature (Soldering, 10 sec)

FE Package 300°C

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LTC3106EUDC#PBF	LTC3106EUDC#TRPBF	LGQH	20-Lead (3mm × 4mm) Plastic QFN	-40°C to 125°C
LTC3106IUDC#PBF	LTC3106IUDC#TRPBF	LGQH	20-Lead (3mm × 4mm) Plastic QFN	-40°C to 125°C
LTC3106EFE#PBF	LTC3106EFE#TRPBF	LTC3106FE	20-Lead Plastic TSSOP	-40°C to 125°C
LTC3106IFE#PBF	LTC3106IFE#TRPBF	LTC3106FE	20-Lead Plastic TSSOP	-40°C to 125°C

Consult LTC Marketing for parts specified with wider operating temperature ranges. *The temperature grade is identified by a label on the shipping container

For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree/>

For more information on tape and reel specifications, go to: <http://www.linear.com/tapeandree/>. Some packages are available in 500 unit reels through designated sales channels with #TRMPBF suffix.

3106f

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the specified junction temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 2). $V_{IN} = 1.5\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $V_{STORE} = 3.6\text{V}$ and V_{AUX} in regulation unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
V_{IN} Start-Up Voltage	Start-Up from V_{IN} , $V_{OUT} = V_{AUX} = V_{STORE} = 0\text{V}$, $RUN = V_{IN}$	●		0.85	1.2	V
V_{IN} Maximum Operating Voltage					5.1	V
V_{IN} Minimum Operating Voltage	V_{STORE} in Operating Voltage Limits, $RUN > 0.613\text{V}$, $ENVSTR$ Pin $> 0.8\text{V}$ (Minimum Voltage Is Load Dependent)	●	0.25	0.3	0.35	V
V_{IN} Minimum No-Load Start-Up Power	Start-Up from V_{IN} , $RUN = V_{IN}$, $V_{OUT} = V_{AUX} = V_{STORE} = 0\text{V}$			12		μW
V_{IN} Undervoltage Quiescent Current	Start-Up from V_{IN} , $RUN = V_{IN}$, $V_{OUT} = V_{AUX} = V_{STORE} = 0\text{V}$	●		1	2	μA
Shutdown Current – V_{IN}	$V_{STORE} = 0\text{V}$, $RUN = 0$ $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●		300	750	nA
				300	450	nA
Quiescent Current – V_{IN}	Switching Enabled, V_{OUT} in Regulation, Non-Switching	●		0.1	1	μA
	Switching Enabled, V_{OUT} in Regulation, Non-Switching, $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)			0.1	0.3	μA
V_{STORE} Maximum Operating Voltage	$PRI = V_{CC}$, $ENVSTR = V_{STORE}$	●			4.3	V
V_{STORE} Minimum Operating Voltage	V_{OUT} in Regulation, V_{CAP} Shorted to V_{STORE} , $PRI = V_{CC}$, $ENVSTR = V_{STORE}$		2.1			V
V_{STORE} Under Voltage Lockout	$PRI = V_{CC}$, $ENVSTR = V_{STORE}$	●	1.730	1.778	1.826	V
V_{STORE} Operating Voltage (Note 7)	$SS1 = 0\text{V}$, $SS2 = 0\text{V}$	●	3.90	4.00	4.10	V
		●	2.70	2.78	2.86	V
	$SS1 = 0\text{V}$, $SS2 = V_{CC}$	●	2.81	2.90	2.99	V
		●	1.85	1.90	1.95	V
	$SS1 = V_{CC}$, $SS2 = 0\text{V}$	●	2.91	3.00	3.08	V
		●	2.08	2.15	2.21	V
	$SS1 = V_{CC}$, $SS2 = V_{CC}$	●	3.90	4.00	4.10	V
		●	2.91	3.00	3.08	V
Output Regulation Voltage	1.8V V_{OUT} Selected $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●	1.75	1.8	1.85	V
			1.755	1.8	1.845	V
	2.2V V_{OUT} Selected $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●	2.14	2.2	2.25	V
			2.145	2.2	2.245	V
	3.3V V_{OUT} Selected $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●	3.22	3.3	3.40	V
			3.23	3.3	3.38	V
5V V_{OUT} Selected $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)		●	4.90	5.0	5.10	V
			4.92	5.0	5.08	V
Quiescent Current – V_{AUX}	Enabled, V_{OUT} in Regulation, Non-Switching, $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●		1.6	3	μA
				1.6	2.5	μA
Quiescent Current – V_{OUT}	Enabled, V_{OUT} in Regulation, Non-Switching, $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●		0.1	1	μA
				0.1	0.3	μA
Quiescent Current – V_{STORE}	Enabled, V_{OUT} in Regulation, Non-Switching, V_{CAP} Shorted to V_{STORE} , $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●		0.1	1	μA
				0.1	0.3	μA
Shutdown Current – V_{STORE}	$V_{IN} = 0\text{V}$, V_{CAP} Shorted to V_{STORE} , $ENVSTR = 0\text{V}$, $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4)	●		0.1	0.7	μA
				0.1	0.3	μA
Shelf Mode V_{STORE} Leakage Current	Isolated V_{STORE} , $ENVSTR = 0\text{V}$			0.1	25	nA
N-Channel MOSFETs – Leakage Current	B and C Switches			0.1	1	μA
P-Channel MOSFETs – Leakage Current	A1, A2, D1 and D2 Switches			0.1	1	μA
N-Channel MOSFET B and C Switch $R_{DS(ON)}$	$V_{IN} = 5\text{V}$			0.5		Ω
P-Channel MOSFET A1 $R_{DS(ON)}$	$V_{IN} = 5\text{V}$			0.5		Ω
P-Channel MOSFET A2 $R_{DS(ON)}$	$V_{STORE} = V_{CAP} = 4.2\text{V}$			1.9		Ω
P-Channel MOSFET D1 $R_{DS(ON)}$	$V_{OUT} = 3.3\text{V}$			0.9		Ω
P-Channel MOSFET D2 $R_{DS(ON)}$	$V_{STORE} = V_{CAP} = 4.2\text{V}$			2.9		Ω

3106f

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the specified junction temperature range, otherwise specifications are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 2). $V_{IN} = 1.5\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $V_{STORE} = 3.6\text{V}$ and V_{AUX} in regulation unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
P-Channel MOSFET AUXSW $R_{DS(ON)}$	$V_{AUX} = 5.4\text{V}$		3		Ω
P-Channel V_{STORE} Isolation MOSFET $R_{DS(ON)}$	$V_{STORE} = 4.2\text{V}$		2		Ω
Peak Current Limit (V_{OUT})	V_{OUT} Powered from V_{IN} , ILIMSEL > 0.8V ● V_{OUT} Powered from V_{IN} , ILIMSEL = 0V ● V_{OUT} Powered from V_{STORE} , ILIMSEL > 0.8V ● V_{OUT} Powered from V_{STORE} , ILIMSEL = 0V ●	530 60 140 60	725 100 200 100		mA mA mA mA
VALLEY Current Limit	V_{OUT} Powered from V_{IN} , ILIMSEL > 0.8V ● V_{OUT} Powered from V_{IN} , ILIMSEL = 0V ● V_{OUT} Powered from V_{STORE} , ILIMSEL > 0.8V ● V_{OUT} Powered from V_{STORE} , ILIMSEL = 0V ●	300 10 30 10	400 44 70 44		mA mA mA mA
Peak Current Limit (V_{STORE} Charging)	V_{STORE} Powered from V_{IN} ●	60	100		mA
PGOOD Threshold	V_{OUT} Falling, Percentage Below V_{OUT}	-11	-9	-7	%
PGOOD Hysteresis	Percentage of V_{OUT}		3		%
PGOOD Voltage Low	$I_{PGOOD} = 100\mu\text{A}$		0.2		V
PGOOD Leakage Current	$V_{PGOOD} = 5\text{V}$		0.1	10	nA
V_{IH} Digital Input High Logic Level	Pins: OS[1:2], SS[1:2], ILIMSEL, ENVSTR, PRI ●	0.8			V
V_{IL} Digital Input Low Logic Level	Pins: OS[1:2], SS[1:2], ILIMSEL, ENVSTR, PRI ●			0.3	V
Digital Input Leakage Current	Pin Voltage = 5.2V, Pins: OS[1:2], SS[1:2], ILIMSEL, PRI		0.1	10	nA
ENVSTR Input Leakage Current	●		44	80	nA
Auxiliary Voltage Threshold	V_{AUX} Rising		5.2		V
Auxiliary Voltage Hysteresis	V_{AUX} Falling, Restart V_{AUX} Charging		50		mV
MPP Pin Output Current	$V_{MPP} = 0.6\text{V}$ ●	1.21	1.5	1.72	μA
MPP Pin Shutdown Current	$V_{MPP} = V_{CC}$		0.1	10	nA
MPP Disable Threshold	Voltage Below V_{CC}	-1	-0.8		V
RUN Threshold - Enable Reference	●	0.15	0.4	0.55	V
Accurate RUN Threshold - Enable Switching from V_{IN}	RUN Pin Voltage Increasing $T_J = -40^\circ\text{C}$ to 85°C (Note 4) ●	0.585 0.591	0.6 0.6	0.615 0.609	V V
Accurate RUN Hysteresis			100		mV
RUN Input Current			0.1	10	nA

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

Note 2: The LTC3106 is tested under pulsed load conditions such that $T_J \approx T_A$. The LTC3106E is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process controls. The LTC3106I is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating junction temperature range. The junction temperature (T_J) is calculated from the ambient temperature (T_A) and power dissipation (P_D) according to the formula:

$$T_J = T_A + (P_D)(\theta_{JA}^\circ\text{C/W})$$

where θ_{JA} is the package thermal impedance. Note the maximum ambient temperature consistent with these specifications is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated package thermal resistance and other environmental factors.

Note 3: This IC includes overtemperature protection that is intended to protect the device during momentary overload conditions. The maximum

rated junction temperature will be exceeded when this protection is active. Continuous operation above the maximum operating junction temperature may impair device reliability or permanently damage the device.

Note 4: Specification is guaranteed by design and not 100% tested in production.

Note 5: Failure to solder exposed backside of the package to the PC board will result in a higher thermal resistance

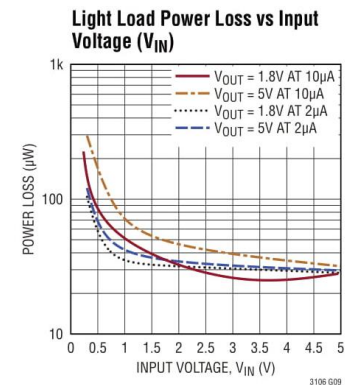
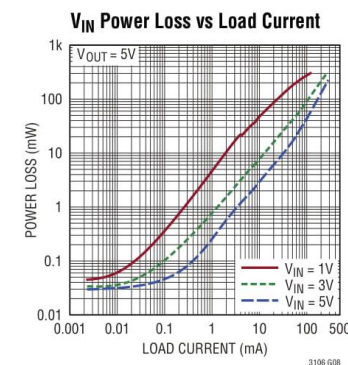
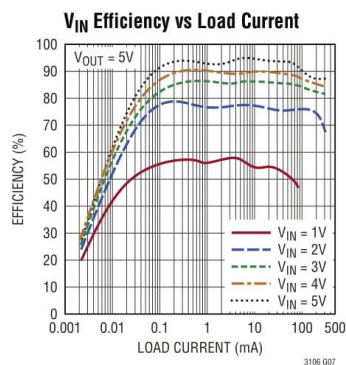
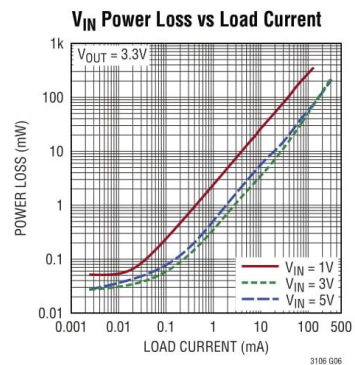
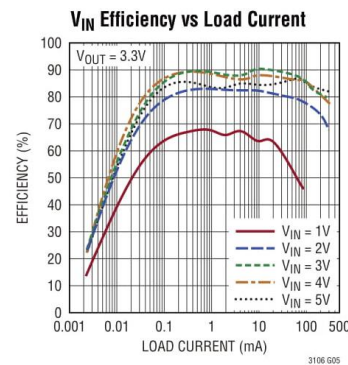
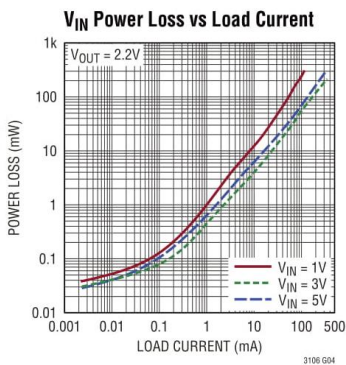
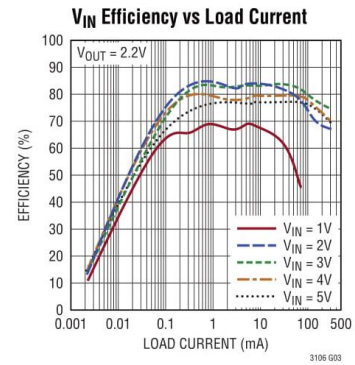
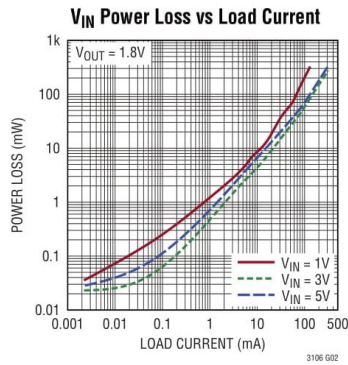
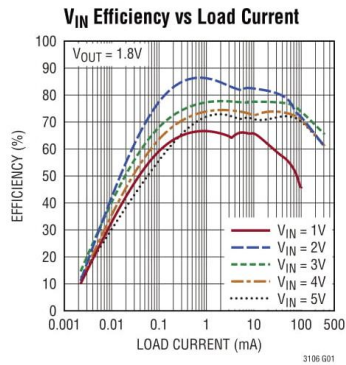
Note 6: Voltage transients on the switch pins beyond the DC limits specified in Absolute Maximum Ratings are non-disruptive to normal operation when using good layout practices as described elsewhere in the data sheet and as seen on the demo board.

Note 7: If PRI = GND, then charging is enabled on V_{STORE} whenever surplus energy is available from V_{IN} . The OV and UV thresholds are the maximum charge and discharge levels controlled by the LTC3106.

Note 8: Some of the IC electrical characteristics are measured in an open-loop test configuration that may differ from the typical operating conditions. These differences are not critical for the accuracy of the parameter and will not impact operation.

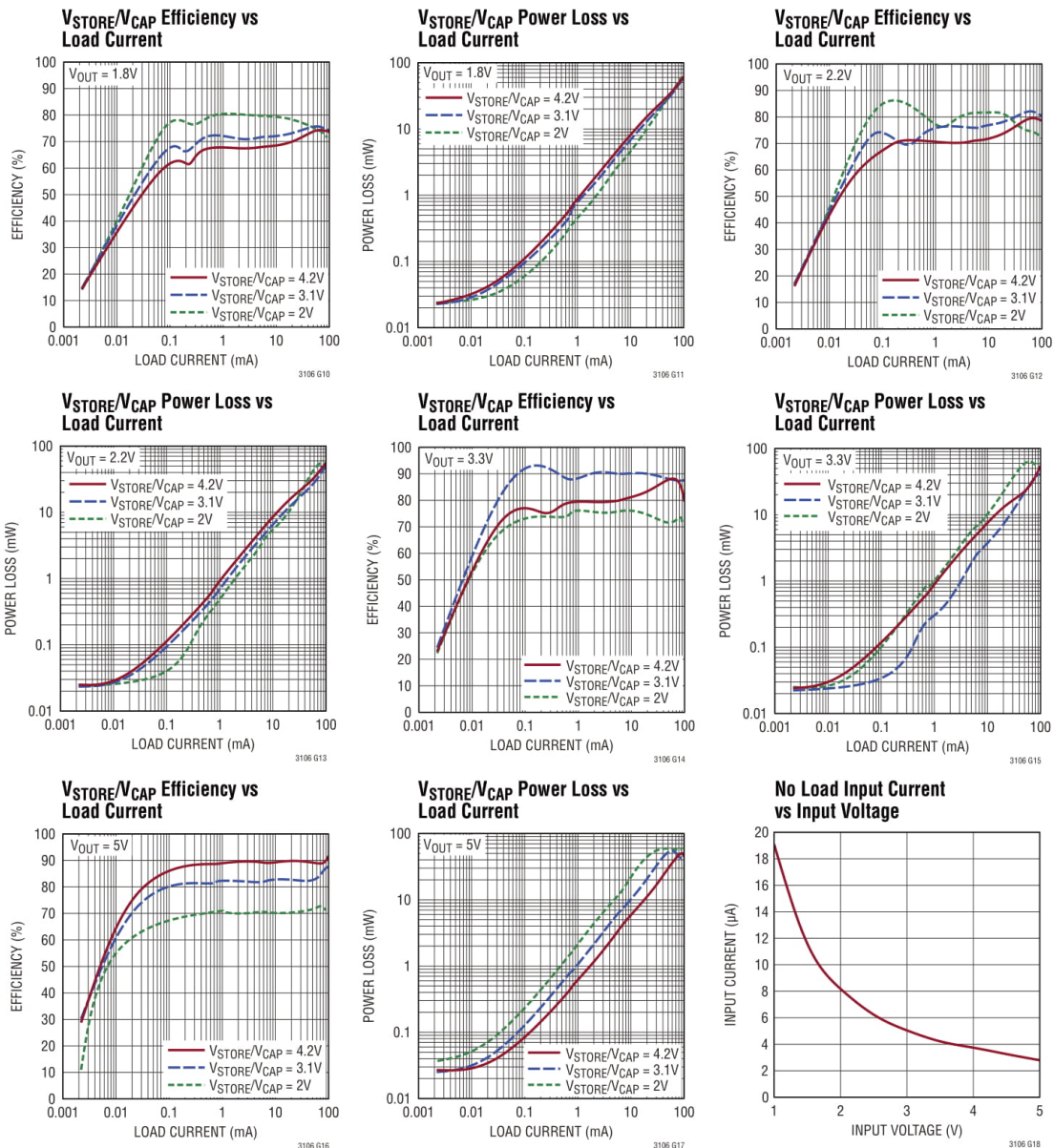
3106I

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

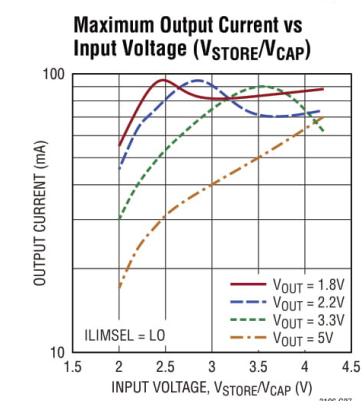
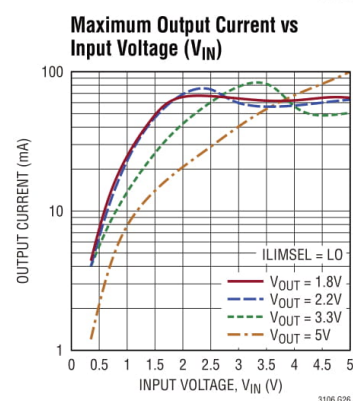
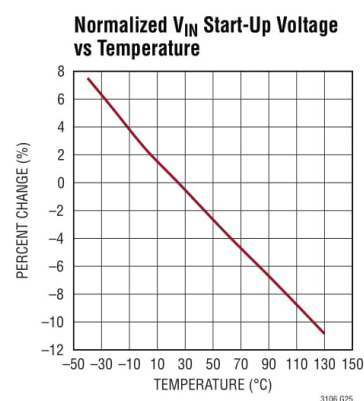
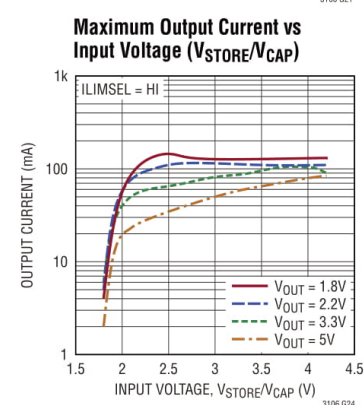
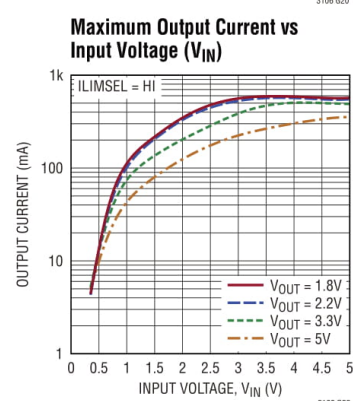
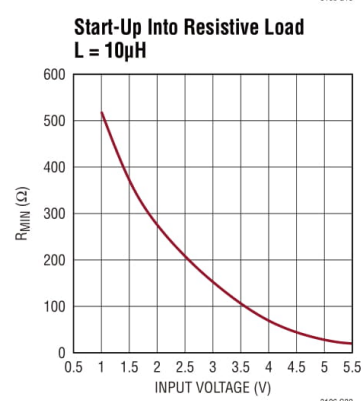
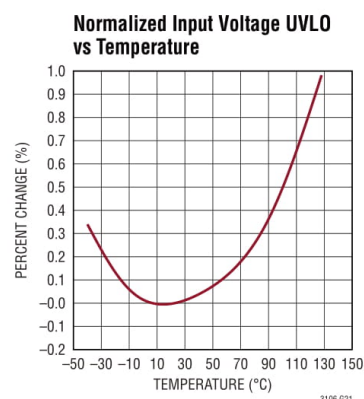
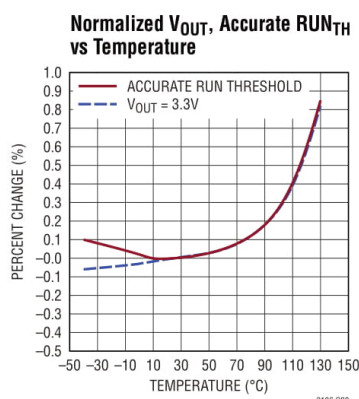
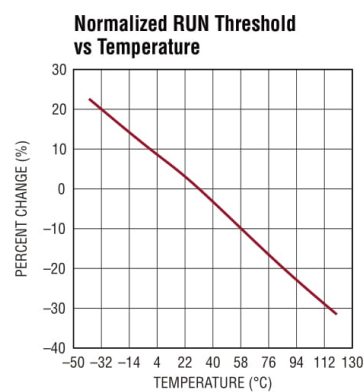
$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.



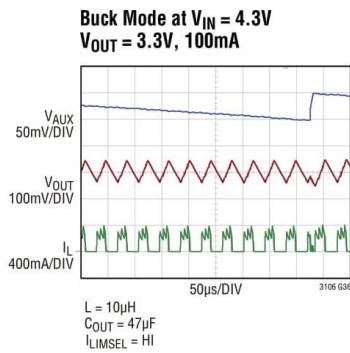
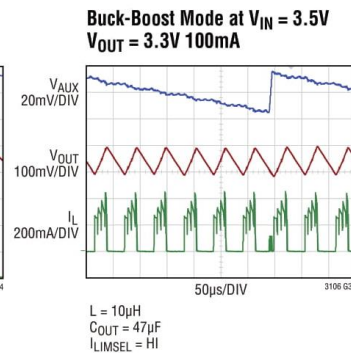
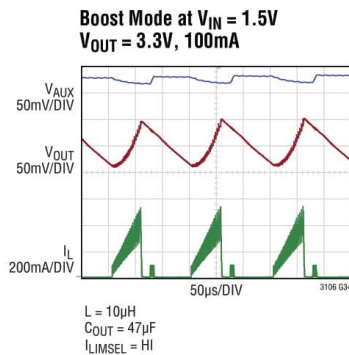
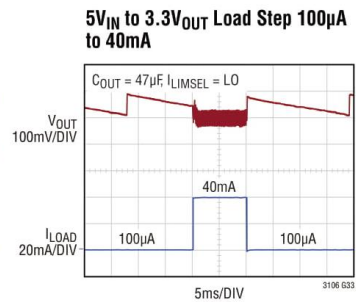
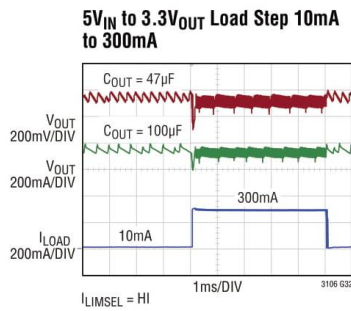
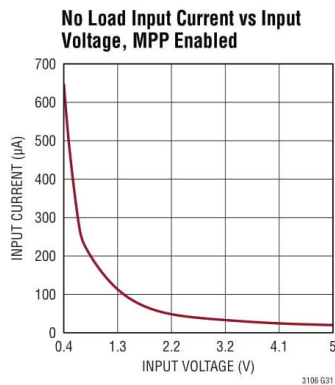
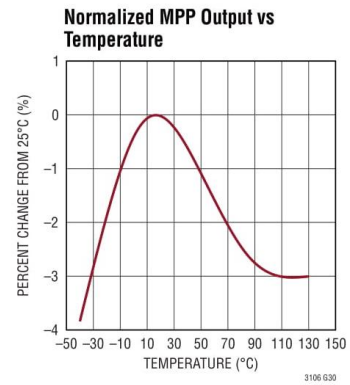
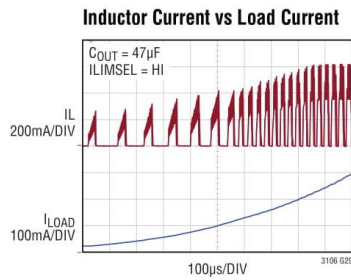
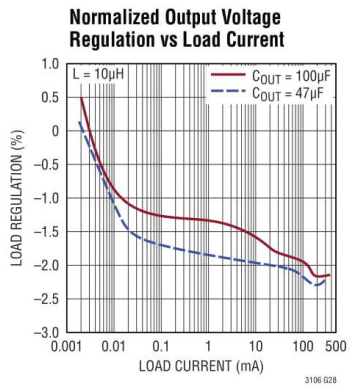
3106f

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.



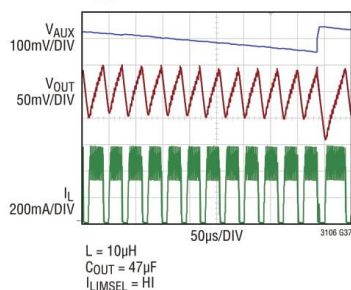
3106f

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.


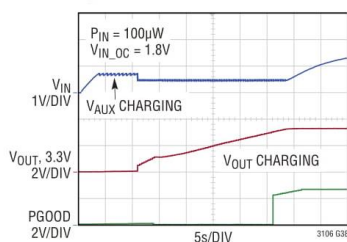
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

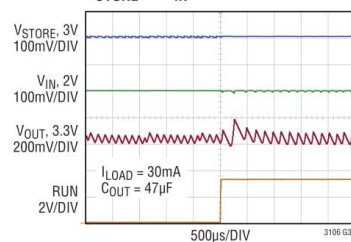
**Buck Mode at $V_{IN} = 5\text{V}$
 $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, 300mA**



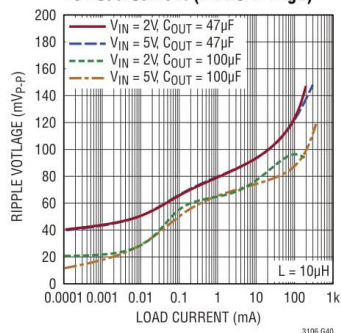
**No-Load Start-Up from Low
Power Source $V_{STORE} = 0\text{V}$,
 $V_{IN} = \text{RUN}$**



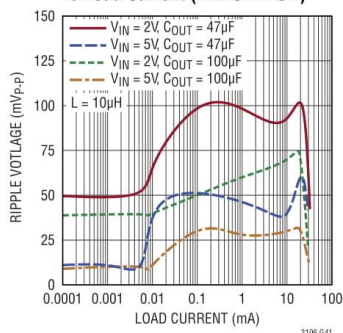
V_{STORE} to V_{IN} Switchover



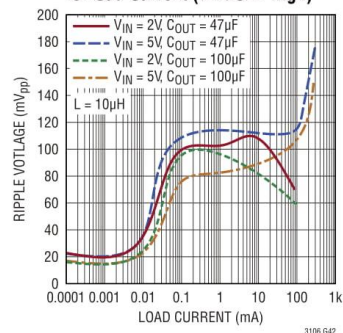
**3.3V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL High)**



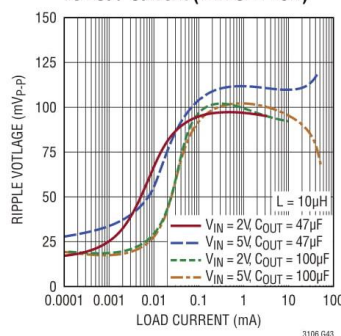
**3.3V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL Low)**



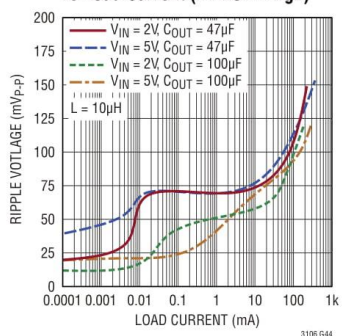
**5V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL High)**



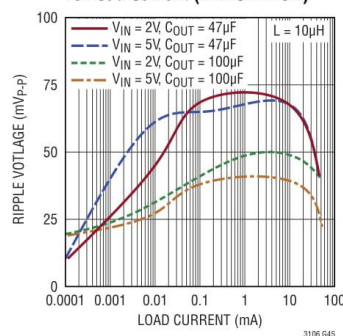
**5V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL Low)**



**1.8V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL High)**



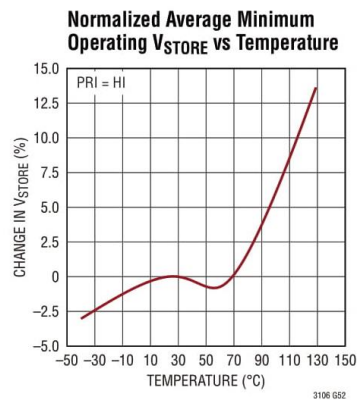
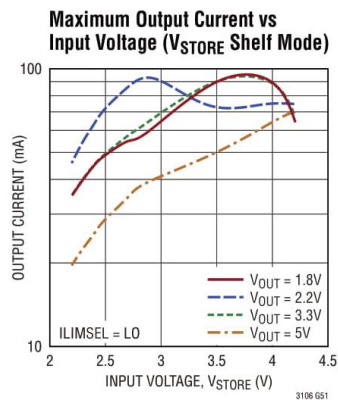
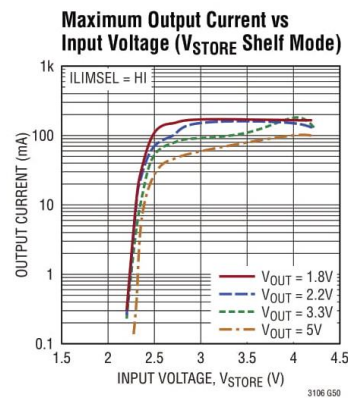
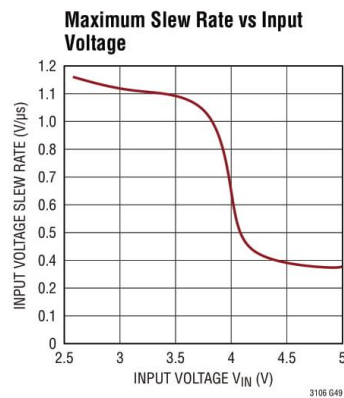
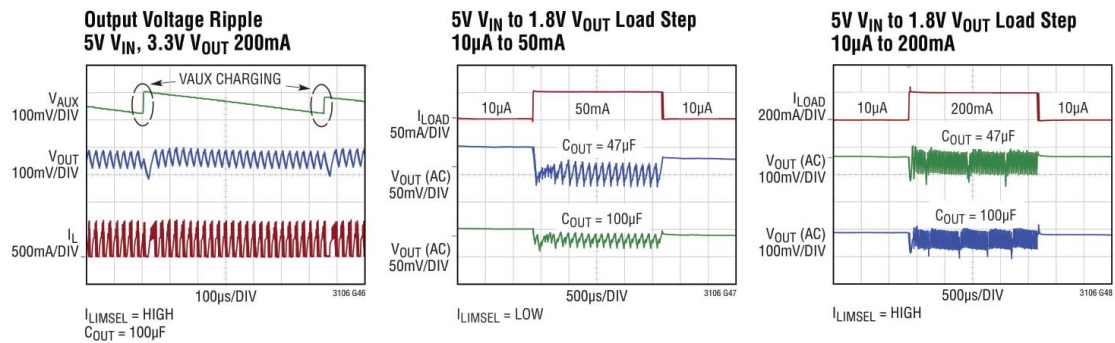
**1.8V Output Voltage Ripple
vs Load Current (LIMSEL Low)**



3106f

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.



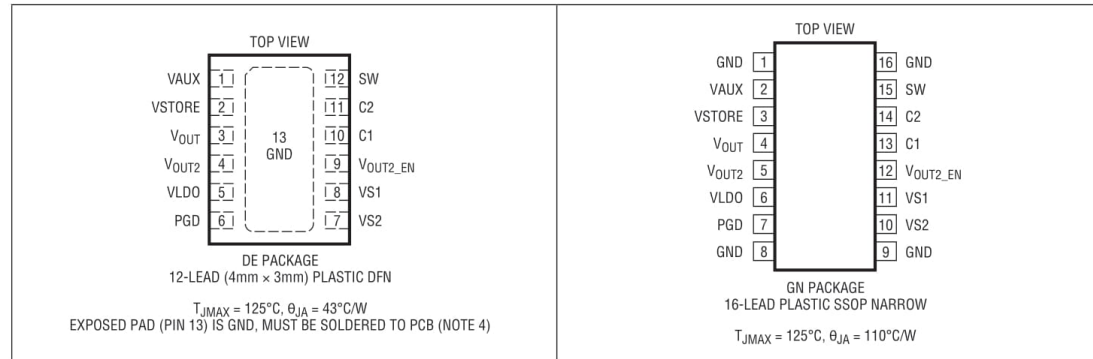
3106f

LTC3108

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

SW Voltage	–0.3V to 2V	VS1, VS2, VAUX, V _{OUT} , PGD	–0.3V to 6V
C1 Voltage.....	–0.3V to 6V	VLDO, VSTORE	–0.3V to 6V
C2 Voltage (Note 5).....	–8V to 8V	Operating Junction Temperature Range	
V _{OUT2} , V _{OUT2_EN}	–0.3V to 6V	(Note 2).....	–40°C to 125°C
VAUX.....	15mA into VAUX	Storage Temperature Range	–65°C to 125°C

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LTC3108EDE#PBF	LTC3108EDE#TRPBF	3108	12-Lead (4mm × 3mm) Plastic DFN	–40°C to 125°C
LTC3108IDE#PBF	LTC3108IDE#TRPBF	3108	12-Lead (4mm × 3mm) Plastic DFN	–40°C to 125°C
LTC3108EGN#PBF	LTC3108EGN#TRPBF	3108	16-Lead Plastic SSOP	–40°C to 125°C
LTC3108IGN#PBF	LTC3108IGN#TRPBF	3108	16-Lead Plastic SSOP	–40°C to 125°C

Contact the factory for parts specified with wider operating temperature ranges. *The temperature grade is identified by a label on the shipping container.
[Tape and reel specifications.](#) Some packages are available in 500 unit reels through designated sales channels with #TRMPBF suffix.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for T_A = 25°C (Note 2). VAUX = 5V, unless otherwise noted.

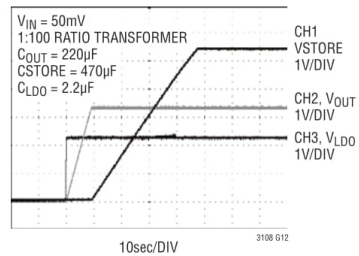
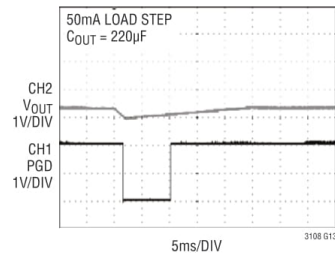
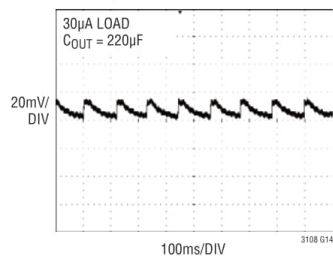
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Minimum Start-Up Voltage	Using 1:100 Transformer Turns Ratio, VAUX = 0V		20	50	mV
No-Load Input Current	Using 1:100 Transformer Turns Ratio; V _{IN} = 20mV, V _{OUT2_EN} = 0V; All Outputs Charged and in Regulation		3		mA
Input Voltage Range	Using 1:100 Transformer Turns Ratio	● V _{STARTUP}		500	mV

Rev. D

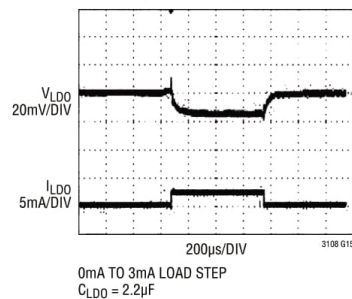
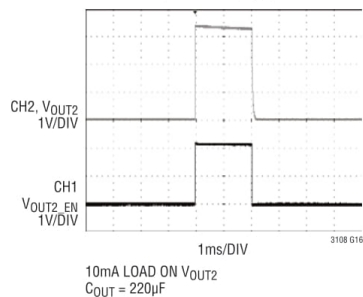
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

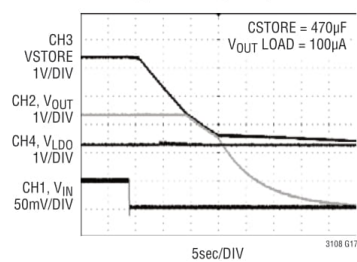
Start-Up Voltage Sequencing

V_{OUT} and PGD Response During a Step LoadV_{OUT} Ripple

LDO Step Load Response

Enable Input and V_{OUT2}

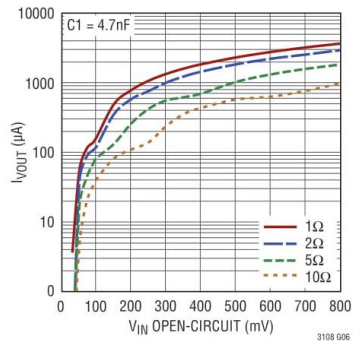
Running on Storage Capacitor



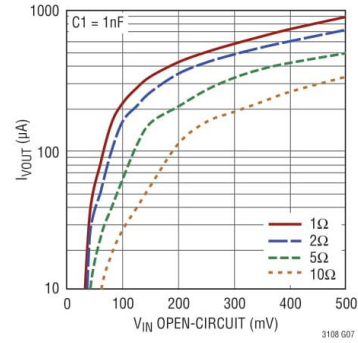
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

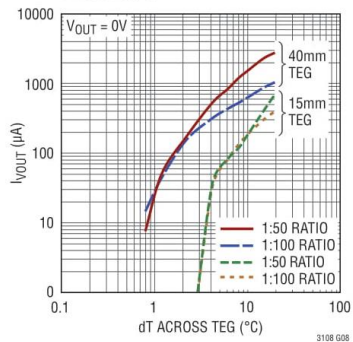
**I_{VOUT} vs V_{IN} and Source Resistance,
1:50 Ratio**



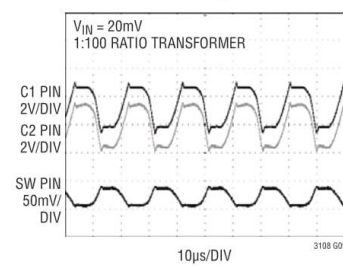
**I_{VOUT} vs V_{IN} and Source Resistance,
1:100 Ratio**



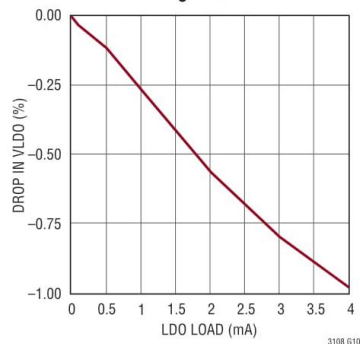
**I_{VOUT} vs dT and TEG Size,
1:100 Ratio**



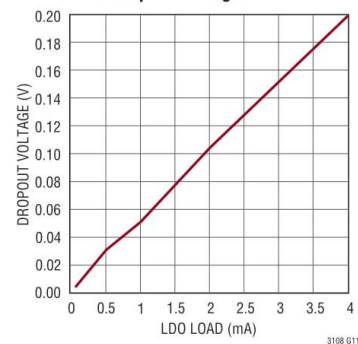
Resonant Switching Waveforms



LDO Load Regulation

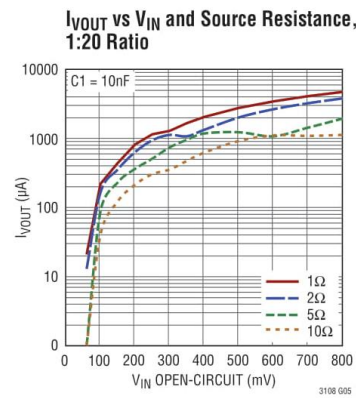
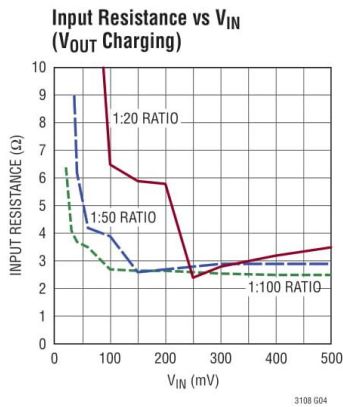
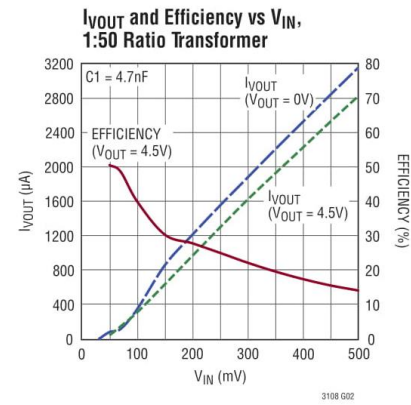
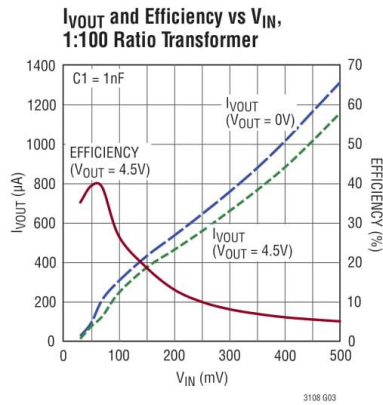
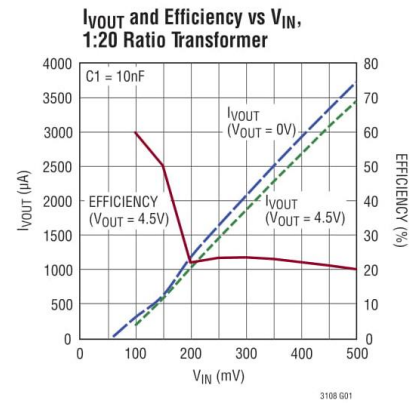
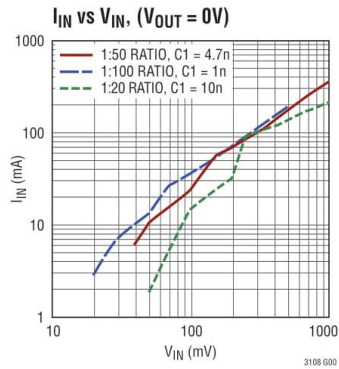


LDO Dropout Voltage



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 2). $VAUX = 5V$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Voltage	$VS1 = VS2 = GND$	●	2.30	2.350	2.40	V
	$VS1 = VAUX, VS2 = GND$	●	3.234	3.300	3.366	V
	$VS1 = GND, VS2 = VAUX$	●	4.018	4.100	4.182	V
	$VS1 = VS2 = VAUX$	●	4.90	5.000	5.10	V
V_{OUT} Quiescent Current	$V_{OUT} = 3.3V, V_{OUT2_EN} = 0V$			0.2		μA
$VAUX$ Quiescent Current	No Load, All Outputs Charged			6	9	μA
LDO Output Voltage	0.5mA Load	●	2.134	2.2	2.266	V
LDO Load Regulation	For 0mA to 2mA Load			0.5	1	%
LDO Line Regulation	For $VAUX$ from 2.5V to 5V			0.05	0.2	%
LDO Dropout Voltage	$I_{LDO} = 2mA$			100	200	mV
LDO Current Limit	$V_{LDO} = 0V$	●	4	11		mA
V_{OUT} Current Limit	$V_{OUT} = 0V$	●	2.8	4.5	7.5	mA
VSTORE Current Limit	$VSTORE = 0V$	●	2.8	4.5	7.5	mA
$VAUX$ Clamp Voltage	Current into $VAUX = 5mA$	●	5	5.25	5.60	V
VSTORE Leakage Current	$VSTORE = 5V$			0.1	0.3	μA
V_{OUT2} Leakage Current	$V_{OUT2} = 0V, V_{OUT2_EN} = 0V$			0.1		μA
$VS1, VS2$ Threshold Voltage		●	0.4	0.85	1.2	V
$VS1, VS2$ Input Current	$VS1 = VS2 = 5V$			0.01	0.1	μA
PGOOD Threshold (Rising)	Measured Relative to the V_{OUT} Voltage			-7.5		%
PGOOD Threshold (Falling)	Measured Relative to the V_{OUT} Voltage			-9		%
PGOOD V_{OL}	Sink Current = 100 μA			0.15	0.3	V
PGOOD V_{OH}	Source Current = 0		2.1	2.2	2.3	V
PGOOD Pull-Up Resistance				1		$M\Omega$
V_{OUT2_EN} Threshold Voltage	V_{OUT2_EN} Rising	●	0.4	1	1.3	V
V_{OUT2_EN} Pull-Down Resistance				5		$M\Omega$
V_{OUT2} Turn-On Time				5		μs
V_{OUT2} Turn-Off Time	(Note 3)			0.15		μs
V_{OUT2} Current Limit	$V_{OUT} = 3.3V$	●	0.15	0.3	0.45	A
V_{OUT2} Current Limit Response Time	(Note 3)			350		ns
V_{OUT2} P-Channel MOSFET On-Resistance	$V_{OUT} = 3.3V$ (Note 3)			1.3		Ω
N-Channel MOSFET On-Resistance	$C2 = 5V$ (Note 3)			0.5		Ω

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

Note 2: The LTC3108 is tested under pulsed load conditions such that $T_J \approx T_A$. The LTC3108E is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process controls. The LTC3108I is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated thermal package thermal resistance and other environmental factors. The junction

temperature (T_J) is calculated from the ambient temperature (T_A) and power dissipation (P_D) according to the formula: $T_J = T_A + (P_D \cdot \theta_{JA}^\circ\text{C/W})$, where θ_{JA} is the package thermal impedance.

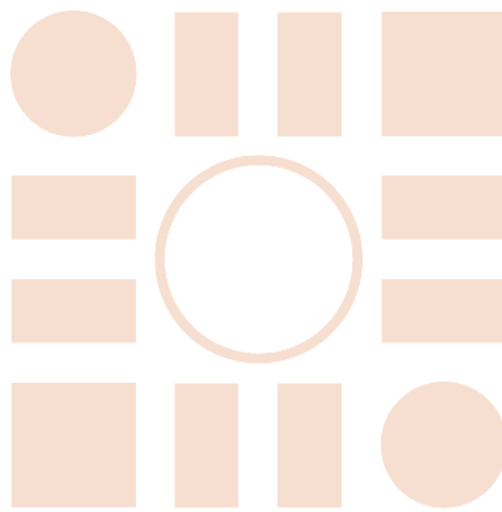
Note 3: Specification is guaranteed by design and not 100% tested in production.

Note 4: Failure to solder the exposed backside of the package to the PC board ground plane will result in a thermal resistance much higher than 43°C/W .

Note 5: The absolute maximum rating is a DC rating. Under certain conditions in the applications shown, the peak AC voltage on the C2 pin may exceed $\pm 8V$. This behavior is normal and acceptable because the current into the pin is limited by the impedance of the coupling capacitor.

Rev. D

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá